БЕЗРАКЕТНАЯ ИНДУСТРИАЛИЗАЦИЯ БЛИЖНЕГО КОСМОСА: ПРОБЛЕМЫ, ИДЕИ, ПРОЕКТЫ

2025

ООО «Астроинженерные технологии»
ЗАО «Струнные технологии»

БЕЗРАКЕТНАЯ ИНДУСТРИАЛИЗАЦИЯ БЛИЖНЕГО КОСМОСА: ПРОБЛЕМЫ, ИДЕИ, ПРОЕКТЫ

Сборник научных трудов
VIII Глобальной конференции
по индустриализации ближнего космоса
(Марьина Горка, 12–13 сентября 2025 г.)

Минск
«СтройМедиаПроект»
2026

Содержание

Приветственное слово Анатолия Юницкого,
доктора философии транспорта, главного инвестора,
председателя организационного комитета
VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса 10

Приветственное слово Петра Витязя,
академика НАН Беларуси, доктора технических наук, профессора,
заслуженного деятеля науки Республики Беларусь,
лауреата Государственной премии и премии Союзного государства в области науки и техники,
начальника управления аэрокосмической деятельности НАН Беларуси,
заместителя руководителя Агентства по космическим исследованиям НАН Беларуси 14

Приветственное слово Анатолия Маркевича,
руководителя Представительства
Постоянного Комитета Союзного государства в г. Минске 17

Приветственное слово Игоря Кожина,
главы Центра международного промышленного сотрудничества ЮНИДО
в Российской Федерации 18

Приветственное слово Александра Маляревича,
члена-корреспондента НАН Беларуси,
доктора физико-математических наук, профессора 21

Приветственное слово Сураджа Хиндж,
почётного гостя из Индии, целителя, натуропата,
блогера и основателя канала Global Richness 22

Приветственное слово Данилы Медведева,
кандидата экономических наук, прикладного футуролога,
специалиста по экологическим решениям
и долгосрочному стратегическому планированию 23

Секция
ГЕОКОСМИЧЕСКИЕ И ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ, ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ И РЕСУРСЫ

Роль струнных технологий в будущей земной, геокосмической и космической логистике 26
Юницкий А.Э.

Моделирование полёта общепланетарного транспортного средства 64
Юницкий А.Э., Лукша В.Л.

Стабилизация общепланетарного транспортного средства относительно взлётно-посадочной эстакады 78
Юницкий А.Э., Карпей Ф.С., Щербич А.А.

Аэродинамическое влияние сетчатых ограждающих конструкций в эстакаде общепланетарного транспортного средства 88
Юницкий А.Э., Дьяков И.И., Щербич А.А.

Системы жизнеобеспечения пассажирского модуля общепланетарного транспортного средства 104
Юницкий А.Э., Бобр Е.В., Артюшевский С.В.

Биосферные системы жизнеобеспечения человека в ЭкоКосмоДоме 116
Юницкий А.Э., Дубовик К.С., Зыль Н.С.

Подготовка сорбента из пуха початков рогоза для очистки воды в замкнутых экосистемах 130
Гаранин В.Н., Боровик А.А., Протасов С.К.

Применение кварценаполненного композита в ответственных узлах взлётно-посадочной эстакады общепланетарного транспортного средства 138
Мозгалёва М.В., Зеленкова Е.Н., Гаранин В.Н., Мозгалёв С.В.

Использование грибного мицелия для изготовления аналога кожи с целью применения в текстильной промышленности 148
Налетов И.В., Заяц В.С., Буглак П.А.

Искривление пространственно-временного континуума как способ гиперпространственных перемещений согласно теории Гипервселенной 154
Хачатуров Р.В.

Газотурбинные установки для энергоснабжения космодромов: внедрение программного комплекса «A2GTP» 160
Савельев М.О., Матвеев Ю.В.

Биопечать в космосе: технические вызовы и перспективы применения 170
Верёвка Ф.А.

Секция
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ГЕОКОСМИЧЕСКИЕ НАУКИ, ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ И РЕСУРСЫ

Системный анализ проблемы разработки внеземных ресурсов для индустриализации ближнего космоса 186
Клюшников В.Ю.

Интеллектуальное управление производством космических аппаратов с использованием цифровых двойников 198
Рысин А.В., Кузьменко В.П., Бобрышов А.П., Лач С.Ю., Солёная О.Я.

Нейросетевой протокол самовосстанавливающихся навигационных данных для автономных космических аппаратов 212
Артёмова М.А.

Оптимизация физико-химических свойств водоугольного топлива с помощью технологии электрогидроудара 226
Юницкий А.Э., Першай Н.С., Борисевич И.О., Арнаут С.А.

Автоматизированная система управления микроклиматом биосферного шатра 238
Юницкий А.Э., Грибоедова А.Р., Давыдик М.М., Гарбачёнок А.В.

Информационные технологии для управления ресурсами в ближнем космосе: вызовы и решения 252
Новицкая Е.В.

Секция
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЗАМКНУТЫХ ЭКОСИСТЕМ БИОСФЕРНОГО ТИПА НА ЗЕМЛЕ И В КОСМОСЕ

Международный проект SIRIUS-23 264
Мастицкая О.С., Яблонская Е.И.

Разработка составов для дражирования семян в условиях ЭкоКосмоДома 276
Коледа А.В., Веремко Е.В., Шерешовец Е.В.

Гумусопоника как перспективный метод выращивания томата обыкновенного в ЭкоКосмоДоме 284
Юницкий А.Э., Крюков Е.А., Парфенчик М.М., Павлюченко А.М., Шерешовец Е.В.

Подбор субстрата для выращивания микрозелени в условиях замкнутой экосистемы ЭкоКосмоДома 290
Юницкий А.Э., Налетов И.В., Заяц В.С., Бойко К.А.

Отбор сортов амаранта овощного в коллекционный питомник для культивирования в замкнутой экосистеме 298
Юницкий А.Э., Заяц В.С., Налетов И.В.

Эликсир плодородия uTerra: комплексное влияние на качество и продуктивность сельскохозяйственных культур 306
Юницкий А.Э., Зыль Н.С., Деменская И.А., Парфенчик М.М., Налетов И.В.

Влияние азотфиксирующих бактерий на содержание азота в субстрате и растениях 316
Пятакова Т.И., Корней В.В., Шерешовец Е.В., Буглак П.А.

Влияние азотфиксаторов на хозяйственную ценность пшеницы мягкой и целесообразность их применения в условиях ЭкоКосмоДома 326
Ракова М.Д., Пятакова Т.И., Налетов И.В.

Структура и биологическая активность гуминовых кислот: перспективы применения в ЭкоКосмоДоме 332
Юницкий А.Э., Конёк Д.А., Першай Н.С., Заяц В.С., Шерешовец Е.В.

Применение uTerra и биоразлагаемых полимеров в устойчивом земледелии 344
Юницкий А.Э., Арнаут С.А., Литвинчук А.А., Першай Н.С.

Способ коррекции двигательных нарушений у лабораторных мышей при антиортостатической гипокинезии 356
Жешко Н.В., Налетов И.В.

Адаптогены для повышения устойчивости к стрессу жителей ЭкоКосмоДома 368
Юницкий А.Э., Корней В.В., Соколова Т.П., Зыль Н.С., Жешко Н.В.

Косметические средства для профилактики влияния пониженной гравитации на организм человека в ЭкоКосмоДоме 380
Веремко Е.В., Коледа А.В.

Применение биополимеров для сохранения замкнутых экосистем биосферного типа 390
Третьякова Т.Г., Шигалёва О.К., Баранкевич А.Э.

Биотехнология аквакультуры африканского клариевого сома в условиях замкнутой экосистемы 402
Павлюченко А.М., Парфенчик М.М., Крюков Е.А., Шерешовец Е.В.

Секция
СОЦИАЛЬНЫЕ, ПРАВОВЫЕ, ПОЛИТИЧЕСКИЕ И ФИНАНСОВЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ ЦИВИЛИЗАЦИИ НА ЗЕМЛЕ И В КОСМОСЕ

Социально-психологические обстоятельства реализации программы «ЭкоМир»: от общества потребления к обществу созидания 414
Юницкий А.Э., Петров Е.О.

Обоснование поэтапного строительства взлётно-посадочной эстакады общепланетарного транспортного средства 422
Юницкий А.Э., Гаранин В.Н., Боровик А.А.

Системообразующие предпосылки и понятийно-проблемные комплексы новой урбанистической концепции uCity 432
Юницкий А.Э., Давыдик М.М.

Социально-экономические эффекты от внедрения урбанистической концепции «Линейный город uCity» 450
Юницкий А.Э., Власовец Е.Н., Кулик О.В., Шанчук А.С.

Африканский транспортно-инфраструктурный коридор – предтеча экваториального линейного города 460
Зарецкий О.М.

Инженерная школа Юницкого как инструмент кадровой перезагрузки Союзного государства 472
Потеряйко А.Ю.

Правовые вопросы создания объектов интеллектуальной собственности в космическом пространстве 480
Казакевич А.П.

Наука и кризис современной цивилизации: индустриализация космоса и безракетные геокосмические технологии 488
Юницкий А.Э., Артюшевский С.В., Бочкарёв Д.В.

Индустриализация и освоение ближнего космоса: рывок в будущее продолжительностью в десятилетие 506
Паценко И.А.

Обоснование механизмов поддержки принятия решений в системах управления проектами программы «ЭкоМир» 520
Гуринович А.А., Серенков П.С.

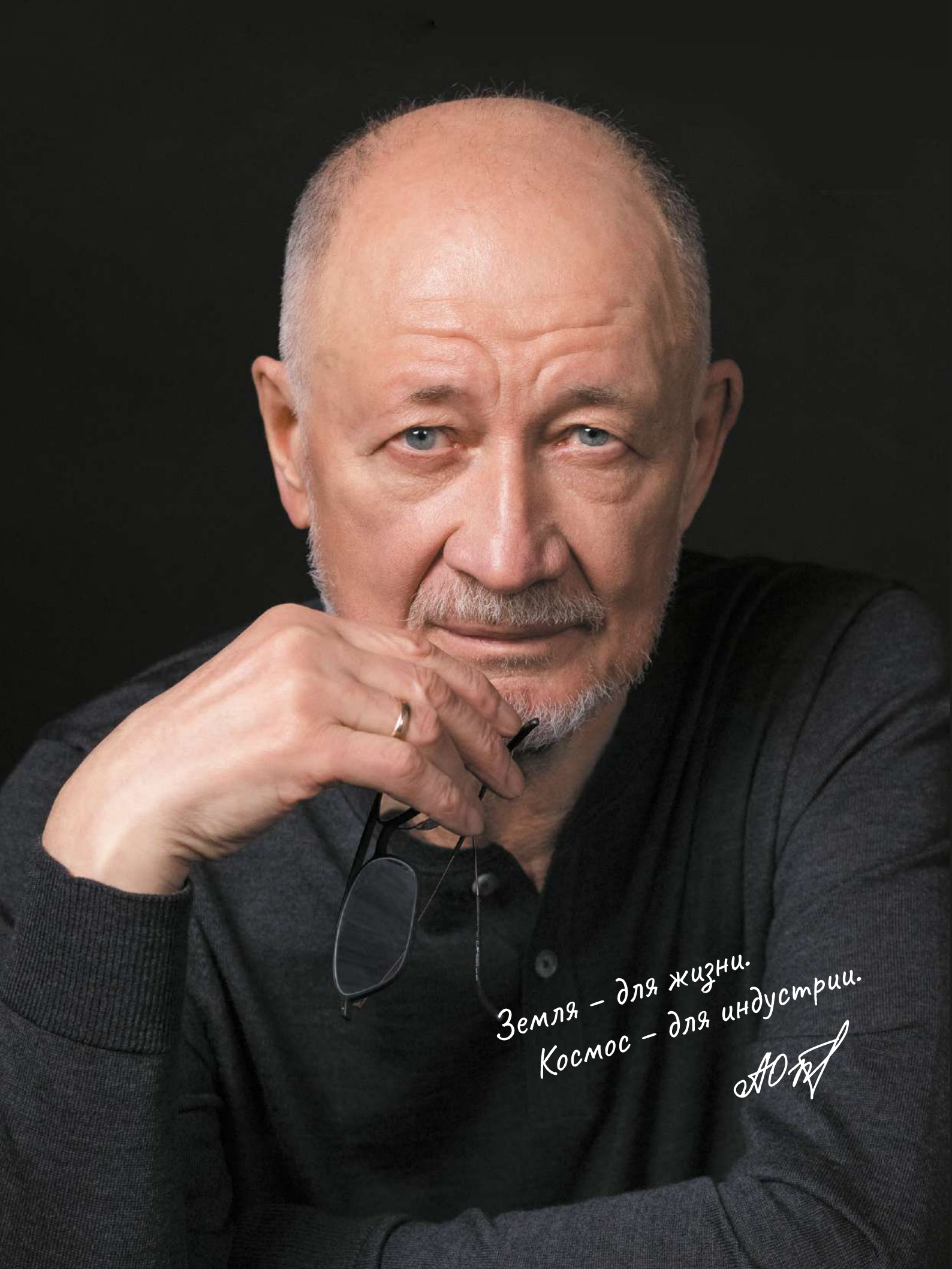
ЭКСПЕРТНЫЙ ДОКЛАД

Фундаментальные основы методологии научного эксперимента 534
Плескачевский Ю.М.

Решение VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса 540

Глоссарий: термины и определения 546

Рецензии на сборник научных трудов VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса 552


Земля – для жизни.
Космос – для индустрии.

Анатолий Юницкий

Автор фундаментальной программы «ЭкоМир» и геокосмической программы uSpace, главный инвестор и председатель оргкомитета Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса.

Учёный, инженер-изобретатель, визионер, более 50 лет занимающийся предотвращением мировой экологической катастрофы и сохранением окружающей среды для будущих поколений; разработал уникальный транспорт – наземный (Струнный транспорт Юницкого – uST) и геокосмический (общепланетарное транспортное средство – ОТС), а также другие инженерные технологии и биотехнологии, дружественные земной биосфере.

Предприниматель, создавший мощную инженерную корпорацию с офисами в Республике Беларусь, Российской Федерации, Индонезии, Объединённых Арабских Эмиратах и Соединённых Штатах Америки. Команда Анатолия Юницкого состоит из высококвалифицированных конструкторов, инженеров, учёных и исследователей – более 1000 специалистов, которые достигли существенных результатов и преуспели в строительстве, сертификации и эксплуатации инновационных транспортно-инфраструктурных комплексов.

Инициатор и ключевая фигура в организации международного диалога по безракетному освоению ближнего космоса. Для координации научных исследований и инженерных разработок, практической реализации программы uSpace создал ООО «Астроинженерные технологии» (Astroengineering Technologies LLC). В 2025 г. компания официально вступила в Международную астронавтическую федерацию (IAF), став первой белорусской организацией с подобным статусом.

Автор более 300 научных статей, более 20 научных монографий, а также владелец более 200 патентов и свидетельств на изобретения, промышленные образцы и товарные знаки в таких отраслях, как космос, строительство, транспорт, машиностроение, сельское хозяйство, электронная и химическая промышленность. Свыше 50 изобретений Анатолия Юницкого внедрены в производство во многих странах. Руководитель двух проектов Программы Организации Объединённых Наций по населённым пунктам (ООН-ХАБИТАТ). Член Федерации космонавтики СССР, академик Российской академии естественных наук.

Антропогенное угнетение биосферы и истощение природных ресурсов достигли такого уровня, что при сохранении текущих темпов роста и развития земной индустриальной техносферы мы рискуем передать в наследство нашим внукам безжизненную пустыню, непригодную для существования. Моя программа «ЭкоМир» обоснована и концептуально реализована в исследовательских центрах Беларуси и ОАЭ. Объединив усилия, мы способны переориентировать техносферу Земли на космический вектор развития, устранив таким образом антропогенный фактор угнетения биосферы.

anatoli-unitsky
unitsky.engineer
ust.inc
uspaceprogram.com

Приветственное слово Анатолия Юницкого,

**доктора философии транспорта,
главного инвестора,
председателя организационного комитета
VIII Глобальной конференции
по индустриализации ближнего космоса**

Уважаемые гости и участники VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса!

Я рад приветствовать всех вас. Восьмой раз мы собираемся вместе, чтобы обсудить будущее индустриализации ближнего космоса – не только как технологический вызов, а как стратегическое направление развития нашей земной человеческой цивилизации, которая, по образному выражению Константина Циолковского, не может вечно оставаться в своей колыбели.

Цифра «восемь», сопровождающая конференцию, имеет для нас особое значение. Данное мероприятие впервые проведено в 1988-м – в году с двойной восьмёркой, что было не случайно: восьмёрка как символ бесконечности отражает нашу веру в безграничные возможности научной мысли и инженерной смелости.

Именно тогда, в конце 1980-х, когда космос ещё оставался прерогативой ракетных технологий, мы заявили о концепции безракетного освоения экваториальных орбит. В то время эта идея казалась чересчур фантастичной, а сейчас поэтапно становится реальностью.

Первая конференция собрала 500 единомышленников, учёных и инженеров из десятка стран – тех, кто не побоялся мыслить вне общепринятых рамок, кто заложил интеллектуальный фундамент решений, которые мы представляем вам сегодня: от геокосмических транспортных систем до экологически чистых орбитальных производств.

За годы своего существования конференция превратилась из инициативы энтузиастов в авторитетную международную платформу, объединяющую научное сообщество, инженерную мысль и стратегическое видение будущего. К нашим мероприятиям присоединились тысячи участников из 35 стран мира – от молодых учёных до признанных экспертов, от представителей академических кругов до лидеров инновационного мышления в своей отрасли.

Результаты этих встреч – не просто обсуждения, а реальные научные достижения. Более 200 исследований, презентованных на конференциях, опубликованы в семи тематических сборниках, которые хранятся в университетских и национальных библиотеках по всему миру – от Минска до Сиднея, от Дели до Лондона. Данные работы послужили основой для новых проектов, диссертаций, патентов и международных коллабораций.

Прошлый год стал для нас знаковым: конференция получила статус глобального форума. Это признание зрелости нашей идеи, её весомости и актуальности на мировой арене. Столь высокий уровень – итог многолетнего совместного труда, доверия между участниками, открытого диалога и стремления к общим целям, а также подтверждение того,

что мы не просто обсуждаем будущее – мы его формируем и строим.

Сегодня Беларусь уверенно заявляет о себе как о стране, способной вносить вклад в освоение космоса наравне с ведущими державами мира. Об этом свидетельствуют достижения отечественных инженеров и учёных, успешные запуски спутников, участие наших космонавтов в орбитальных миссиях. Всё это результат системной работы, технологической зрелости и плодотворной деятельности научной школы.

Группа компаний Юницкого также активно участвует в данном процессе, развивая на белорусской земле уникальные космические технологии. Представленные на конференции проекты – инженерные решения и стратегические инициативы – могут послужить локомотивом национального развития и изменить вектор эволюции человеческой цивилизации.

Ключевая концепция, которая и сегодня звучит как вызов привычному мышлению, разработана 50 лет назад. Это общепланетарное транспортное средство (ОТС), способное за один рейс доставить в ближний космос до 10 млн тонн грузов и до 10 млн пассажиров. ОТС – инженерно аргументированная модель, основанная на использовании лишь электрической энергии и внутренних центробежных сил, без какого-либо взаимодействия с окружающей средой.

Во имя сохранения жизни, природы и будущего для наших детей и внуков мы обязаны пересмотреть саму философию технократического развития. Речь идёт не об остановке промышленности, а о переносе её опасных компонентов туда, где они не будут угрожать земным экосистемам, – в ближний космос. Всё остальное нужно трансформировать, чтобы оно служило людям, а не разрушало среду их обитания.

Такой самонесущий геокосмический летательный аппарат не только расширяет горизонты освоения космоса. Он открывает путь к выносу вредных промышленных производств за пределы Земли, снижая техногенную нагрузку, и предоставляет индустриальный доступ к бесконечным космическим ресурсам – минеральным, энергетическим, пространственным, а также к ресурсам, отсутствующим на планете: невесомости, глубокому вакууму, технологической чистоте.

ОТС с точки зрения физики – единственный инженерный инструмент, способный решить задачу столь масштабного перемещения на экваториальные орбиты и обратно. То, на что ракетным технологиям потребовались бы тысячелетия, геокосмический трёхколёсный электромобиль, имеющий корпус и два ленточных маховика, охватывающих Землю, может выполнить за один рейс.

Проект ОТС – не просто техническая идея. Это ответ на вызовы времени: перенаселение, энергетический кризис, экологические угрозы. Он открывает путь к созданию космических поселений биосферного типа, к новым способам производства энергии и материалов в условиях невесомости. Самое главное – он даёт возможность вынести за пределы планеты опасные отрасли промышленности, которые сегодня угрожают земным экосистемам и здоровью будущих поколений.

Моя родная деревня Крюки на белорусском Полесье стала жертвой техногенной катастрофы – аварии на Чернобыльской АЭС. После взрыва радиоактивное облако накрыло этот регион, и люди были вынуждены навсегда покинуть свои дома, не успев даже проститься с землёй, на которой жили их предки. Для меня это стало не только личной трагедией, а предупреждением всему человечеству: если индустрия выходит из-под контроля, мы рискуем потерять свой единственный дом – биосферу планеты Земля.

Во имя сохранения жизни, природы и будущего для наших детей и внуков мы обязаны пересмотреть саму философию технократического развития. Речь идёт не об остановке промышленности, а о переносе её опасных компонентов туда, где они не будут угрожать земным экосистемам, – в ближний космос. Всё остальное нужно трансформировать, чтобы оно служило людям, а не разрушало среду их обитания.

Человечество способно развиваться иначе: внедрять экологичный транспорт, возводить города, не создающие шума и загрязнений, строить биоэлектростанции, которые функционируют в гармонии с природой, а не вопреки ей. Группа компаний Юницкого уже сегодня реализует такие проекты.

В Беларуси в экопарке «Акварель» можно увидеть наши струнные дороги с юнимобилями – транспортом будущего, не нарушающим природный ландшафт, а также посетить экологичные дома с садами на крышах и оранжереями внутри, где технологии служат на благо человека. Мы с радостью угостим вас органическими овощами и фруктами, выращенными без химикатов – с использованием собственных разработок.

В настоящее время научные исследования и практические решения, представленные на конференции, получают всё более широкую поддержку как на государственном уровне, так и в международных институтах. Среди наших партнёров – Национальная академия наук Беларуси, Организация Объединённых Наций по промышленному развитию (ЮНИДО), альянс БРИКС+ и другие авторитетные учреждения.

Это лишь первые шаги. Однако именно они дают нам силы и вдохновение продолжать путь, потому что каждый реализованный проект – доказательство того, что гармоничное будущее реально. И оно начинается здесь, сегодня, с наших усилий и нашей веры.

Я выражаю искреннюю благодарность всем, кто делает VIII конференцию возможной: участникам, гостям, авторам докладов и организаторам – особенно коллективам «Астроинженерных технологий», «Струнных технологий» и Крестьянского (фермерского) хозяйства «Юницкого».

Благодаря вам конференция является не просто местом встречи, а живой платформой для поиска решений, обмена знаниями и укрепления связей между инженерией, наукой и обществом. Желаю каждому из присутствующих продуктивной работы, неиссякаемой энергии и вдохновения. Пусть наши общие усилия приведут к созданию мира, где космос будет доступным, а Земля останется безопасной, чистой и живой для будущих поколений.

Объявляю VIII Глобальную конференцию по безракетной индустриализации ближнего космоса открытой!

ПРИВЕТСТВЕННОЕ СЛОВО АНАТОЛИЯ ЮНИЦКОГО,
доктора философии транспорта, главного инвестора, председателя организационного комитета
VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса

Приветственное слово Петра Витязя,

академика НАН Беларуси, доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки Республики Беларусь, лауреата Государственной премии и премии Союзного государства в области науки и техники, начальника управления аэрокосмической деятельности НАН Беларуси, заместителя руководителя Агентства по космическим исследованиям НАН Беларуси

Глубокоуважаемые Анатолий Эдуардович, Надежда Геннадьевна, уважаемые участники VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса и приглашённые гости!

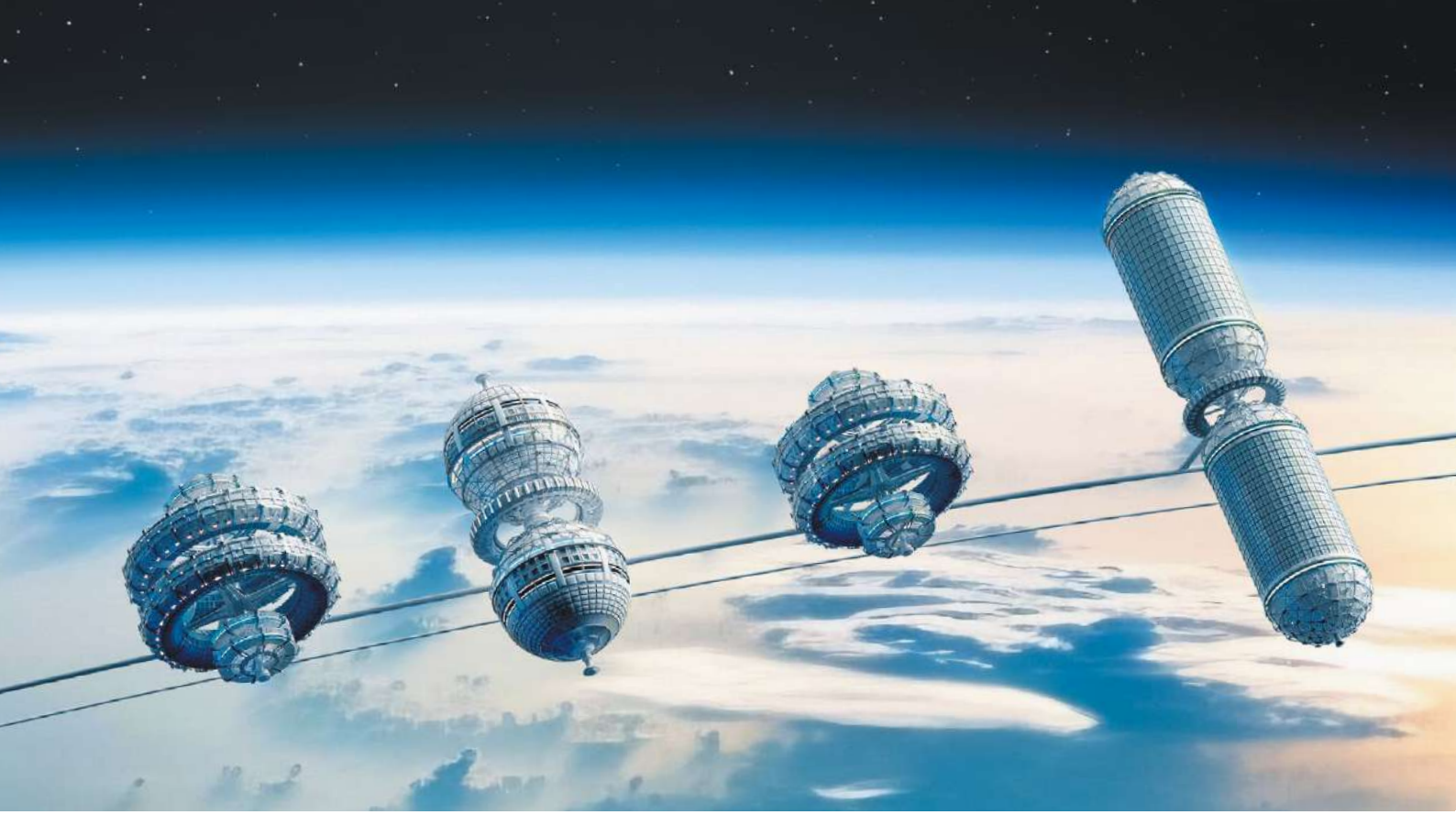
Мне очень приятно снова быть среди вас и принимать участие в открытии восьмой конференции, посвящённой освоению космоса на благо человека. Как сказал Анатолий Эдуардович Юницкий: «Земля – для жизни. Космос – для индустрии».

От имени сотрудников Национальной академии наук Беларуси позвольте передать самые искренние пожелания успехов и настойчивости в решении комплексных задач, стоящих сегодня перед человечеством, учёными и инженерами – всеми, кто занимается исследованием околоземного пространства.

С каждым годом неуклонно растёт интерес к развитию космических технологий, что обусловлено не только их престижностью, но и объективной необходимостью: современная цивилизация уже не может существовать без достижений в данной сфере. По оценкам Организации Объединённых Наций, до 40 % всех передовых земных технологий тем или иным образом опирается на космические разработки – от радиолокационного зондирования и глобальной навигации до обслуживания связи и телевидения и множества других направлений деятельности. Вместе с тем освоение космоса важно не только с прикладной точки зрения, потому что помогает искать ответы на фундаментальные вопросы: откуда возникла жизнь, как она развивается и что мы можем сделать, чтобы сохранить её на Земле? Сегодня мир переживает непростое время и перед нами стоят не только инженерные и технологические, но и собственно человеческие задачи.

Космические технологии имеют важное преимущество: всё, что работает в космосе, работает и на Земле. Значит, космическая технология является практически локомотивом для развития всех отраслей на нашей планете.

Позвольте коротко представить достижения Беларуси в космической сфере. За последние годы создана Белорусская космическая система дистанционного зондирования Земли с разрешением 2 м, обеспечивающая необходимыми данными 11 министерств и ведомств нашей республики. Ведётся работа над белорусско-российским аппаратом с разрешением 0,35 м, который планируется вывести на космическую орбиту в 2028 г. Активно развивается сотрудничество со многими организациями в рамках Союзного государства Беларуси и России. Реализованы восемь союзных программ по космической тематике. Выполняется программа «Комплекс-СГ», в рамках которой создаются



три космических аппарата – два наноспутника и один малый спутник для дистанционного зондирования Земли. Для изучения ионосферы Национальная академия наук Беларуси уже изготовила два наноспутника, запуск которых ожидается до конца 2025 г. Кроме того, в Республике Беларусь функционирует спутник связи и телевидения; в 2023 г. БГУ вывел на орбиту научно-учебный наноспутник. В стране ведётся подготовка кадров по космическим специальностям – в БГУ, БГУИР, БНТУ, БГТУ и др.

Хочется отметить особые достижения в новых направлениях освоения околоземного пространства: белоруска Марина Василевская в 2024 г. побывала на Международной космической станции вместе с соотечественником Олегом Новицким, где космонавты выполнили серию научных экспериментов. Наша страна гордится этим достижением, Марина Василевская удостоена звания Героя Беларуси.

Сегодня на VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса присутствует Ольга Мастицкая – белорусская участница международного проекта SIRIUS-23, завершившегося в 2024 г. В рамках эксперимента шесть исследователей провели целый год в полной изоляции – в условиях, приближенных к космическим. Этот сложный и уникальный эксперимент позволил изучить не только психологические аспекты длительных космических миссий, но и вопросы выхода в открытый космос, подготовки полётов на Луну и др. Кроме того, белоруска проводила опыты по культивированию растений в ограниченных условиях и занималась изучением проблем, связанных с жизнью в изоляции. Об участии в данной программе она расскажет в своём выступлении при открытии секции «Экологические и биологические аспекты замкнутых экосистем биосферного типа на Земле и в космосе».

Космические технологии имеют важное преимущество: всё, что работает в космосе, работает и на Земле. Значит, космическая технология является практически локомотивом для развития всех отраслей на нашей планете.

Недавно в стране прошёл Фестиваль науки, в рамках которого работала секция, посвящённая космосу. На мероприятии выступили Марина Василевская и Олег Новицкий. Мы увидели живой интерес у школьников и студентов к моделированию и созданию спутников, что демонстрирует высокий кадровый потенциал.

В заключение хочу сказать: многое уже сделано для покорения космоса, но впереди – ещё больше. Полностью поддерживаю энтузиаста, мирового инженера, учёного Анатолия Эдуардовича Юницкого. Освоение околоземного пространства заманчиво с точки зрения переноса индустрии с Земли в космос, но требует решения многих технологических, инженерных и других проблем. Однако наша главная задача – воспитать новое поколение землян, которые ради всего человечества будут помогать друг другу, творить добро, беречь мир и саму жизнь. Именно с появлением нового общества лозунг «Земля – для жизни. Космос – для индустрии» станет реальностью и мы сможем сохранить нашу планету для будущих поколений!

Благодарю организаторов конференции и всю команду за работу, которую вы проводите. Желаю здоровья, счастья и вдохновения!

По оценкам Организации Объединённых Наций, до 40 % всех передовых земных технологий тем или иным образом опирается на космические разработки – от радиолокационного зондирования и глобальной навигации до обслуживания связи и телевидения и множества других направлений деятельности.

Приветственное слово Анатолия Маркевича,

руководителя Представительства Постоянного Комитета Союзного государства в г. Минске

Добрый день, уважаемые коллеги! Добрый день, дорогие друзья!

Позвольте от имени Постоянного Комитета Союзного государства высказать слова признательности и благодарности за приглашение на столь знаковое событие, коим является VIII Глобальная конференция по индустриализации ближнего космоса. Цель данного мероприятия – улучшение экологической, экономической и социальной обстановки на прекрасной планете Земля.

Индустриализация ближнего космоса – звучит заманчиво, необычно и порой даже фантастически. Вместе с тем мир знает огромное количество примеров, когда фантастика становилась реальностью нашей жизни. Уверен, что те идеи, которые звучат сегодня, и не только сегодня, а на протяжении уже более 40 лет, обязательно будут воплощены в настоящих земных проектах благодаря компетенциям, научному подходу, энтузиазму и высочайшему профессионализму тех, кто посвятил свою жизнь освоению космоса.

Постоянный Комитет Союзного государства всегда поддерживает важные инициативы, которые нацелены на создание безопасных и комфортных условий жизни людей. С помощью таких проектов и программ мы заглядываем в будущее, организуем новые рабочие места и укрепляем экономические связи между нашими государствами.

Искренне желаю участникам конференции плодотворной работы, блестящих идей и их реализации на благо человечества! А яшчэ – мірнага неба, духмянага хлеба, крынічнай вады і ніякай бяды!

Индустриализация ближнего космоса – звучит заманчиво, необычно и порой даже фантастически. Вместе с тем мир знает огромное количество примеров, когда фантастика становилась реальностью нашей жизни.

Приветственное слово Игоря Кожина,

главы Центра международного промышленного сотрудничества ЮНИДО в Российской Федерации

Дорогие участники, организаторы и гости VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса!

От имени Центра международного промышленного сотрудничества ЮНИДО в Российской Федерации рад приветствовать вас на уникальном научном форуме.

Для меня большая честь уже в третий раз участвовать в работе конференции, проводимой при поддержке и под руководством Анатолия Эдуардовича Юницкого. За прошедшие годы мероприятие стало важной площадкой для обсуждения перспективных инженерных идей и поиска инновационных решений глобальных проблем.

Основная миссия ЮНИДО – содействовать всеобщему и стабильному промышленному развитию, помогать странам в достижении Целей устойчивого развития ООН. Мы рассматриваем индустриализацию ближнего космоса как часть данной широкомасштабной повестки, ведь именно передовые технологические разработки способны помочь человечеству справиться с серьёзными планетарными вызовами: изменением климата, истощением природных ресурсов, угрозами продовольственной безопасности.

Как говорит Генеральный директор ЮНИДО господин Герд Мюллер, «развитие современных технологий, инновационных производственных решений и устойчивой индустриализации является ключом к обеспечению экономической справедливости, социальной стабильности и защиты глобального климата». Мы убеждены, что подобные инициативы не только позволяют создавать новые рабочие места, но и делают возможным справедливое участие стран Глобального Юга в мировых цепочках добавленной стоимости, одновременно сокращая экологический след промышленности.

Отмечу: технологии, знания и инвестиции необходимо использовать таким образом, чтобы приносить реальные преимущества развивающимся странам, при этом строго соблюдая экологические стандарты и права людей в соответствии с Уставом ООН.

Как многие знают, между нашим Центром и научной организацией ЗАО «Струнные технологии», а также ООО «Астроинженерные технологии» подписана совместная декларация о сотрудничестве и развитии. Именно поэтому особенно приятно поделиться с вами важной новостью: мы получили официальное подтверждение от руководства ЮНИДО о поддержке совместного проекта Центра ЮНИДО в России и компании «Астроинженерные технологии» – «Продвижение экологически чистых технологий для повышения плодородия деградировавших почв, обеспечения продовольственной безопасности и борьбы с опустыниванием».

Ключевая цель – внедрение инновационных биотехнологий для восстановления плодородия земель, пострадавших от деградации и опустынивания, а также последующее масштабирование полученного опыта.

Мы рассчитываем, что реализация данного проекта позволит улучшить экологическую ситуацию, повысить продовольственную безопасность в уязвимых регионах, создать новые рабочие места и укрепить промышленный потенциал, тем самым способствуя достижению 15-й Цели устойчивого развития ООН – защите и восстановлению экосистем суши. Надеемся, что уже вскоре в рамках глобальной программы uSpace приступим к продуктивной деятельности вместе с участниками декларации, входящими в группу компаний Юницкого.

Уверены, что наше взаимодействие будет и далее развиваться, принося конкретные практические результаты. Официальное подтверждение проекта ЮНИДО – яркое доказательство того, что идеи, обсуждаемые на этой площадке, смогут трансформироваться в реальные международные инициативы.

Мы стремимся к тому, чтобы индустриализация и инновации не только создавали экономическую ценность, но и служили решению глобальных социальных и экологических проблем.

Всё чаще в современном мире слышно о космических инициативах, но большинство из них по-прежнему опирается на традиционные ракетные технологии. Программа uSpace предлагает иной путь – безракетную индустриализацию ближнего космоса. То, что ещё недавно считалось фантастикой, сегодня становится реальностью, и мы видим, как это происходит.

Технологии Анатолия Эдуардовича Юницкого уже внедряются не только в Беларуси и на Ближнем Востоке, но и на Западе. Уверен, что наше сотрудничество позволит привлечь инвестиции и поможет информационному продвижению прорывных инноваций. Я как глава Центра ЮНИДО в Российской Федерации буду всеми силами этому содействовать. Более того, Цели устойчивого развития, которые провозглашаются ООН, полностью отражаются в деятельности компаний, подписавших декларацию, что, на мой взгляд, исключительно важно.

Мы понимаем, в каком состоянии находится наша планета, как деградируют почвы, как меняется климат. Недавно учёные установили, что даже в закрытых экосистемах – в горах и на островах, недоступных для посещения, – количество насекомых сократилось на 70 %. Глобальное потепление, связанное с техногенным воздействием на окружающую среду, серьёзно влияет на каждого из нас.

В связи с этим считаю, что разработки группы компаний Юницкого – не просто инновации, а реальный вклад в сохранение Земли и улучшение качества жизни всех людей.

Желаю участникам конференции плодотворной работы, интересного общения, новых идей и дальнейших успехов в воплощении проектов, направленных на устойчивое будущее человечества! Убеждён, недопонимание не даёт миру развиваться, а такие конференции, которые проводят компания «Астроинженерные технологии» и Анатолий Эдуардович, помогают находить общий язык, объединять усилия и решать самые сложные проблемы.

Всем успехов и вдохновения!

Программа uSpace предлагает иной путь – безракетную индустриализацию ближнего космоса. То, что ещё недавно считалось фантастикой, сегодня становится реальностью, и мы видим, как это происходит.

Приветственное слово Александра Маляревича,

члена-корреспондента НАН Беларуси, доктора физико-математических наук, профессора

Уважаемый Анатолий Эдуардович, уважаемые участники конференции!

Прежде всего выражаю благодарность организаторам за приглашение и возможность вновь присутствовать на этом значимом мероприятии. Для меня большая честь обращаться к вам с приветственным словом.

Когда я впервые познакомился с идеей Анатолия Эдуардовича Юницкого, она поразила своей широтой и глубиной. Главное: она не просто замысел, она реализуется! Мне интересно и приятно знакомиться с результатами каждой конференции, проходящей здесь, ведь такой научный форум позволяет передавать юному поколению, студентам и молодым специалистам инновационные решения, которые ещё вчера казались фантастикой, а сегодня становятся реальностью.

Надеюсь, в обозримой перспективе удастся сформировать атмосферу, где человечество начнёт по-другому относиться к нашей колыбели – планете Земля: воплощать глобальную идею экологичного образа жизни, создавать удобства для людей и одновременно способствовать ускоренному развитию индустрии без вреда природе и обществу.

Стоит отметить, что среди участников конференции и в команде Юницкого много молодёжи. Нестандартность мышления молодого человека, который ещё не приобрёл большого количества наработанных, усвоенных, ставших привычными знаний и методов поведения, позволяет реализовывать без страха новые, совершенно необычные проекты. Это подтверждённый факт. Например, Альберту Эйнштейну не исполнилось и 30 лет, когда в начале XX в. он объяснил законы фотоэффекта, открытого русским учёным Александром Столетовым примерно за 20 лет до этого. Огюстену Френелю, который в начале XIX в. создал теорию света с точки зрения, что свет является волной, также было около 30. Наконец, Макс Планк тоже не был убелённым сединами старцем, когда в 1900 г. совершил революцию в физике, обосновав, что свет – это не только волна, а ещё и частица, т. е. введя понятие кванта. Очевидно, что именно молодые люди смогут быстрее продвинуть решение революционной задачи.

Желаю участникам конференции плодотворной работы, богатого обмена мнениями, новых идей и, конечно же, молодости – как физической, так и интеллектуальной!

Приветственное слово Сураджа Хиндж,

почётного гостя из Индии, целителя, натуропата, блогера и основателя канала Global Richness

Намасте! Здравствуйте!

Я хотел бы поделиться одной древней формулой, описанной в священных текстах индуизма. В ней говорится о трёх сущностях: Лакшми, Парвати, Сарасвати.

Лакшми – богиня благополучия и богатства.

Парвати – богиня красоты и здоровья.

Сарасвати – богиня мудрости и просвещения.

Я поклоняюсь этим трём началам – благополучию, здоровью и мудрости. Программа uSpace, как мне кажется, воплощает такие ценности на практике. Когда всё находится в гармонии, люди естественным образом начинают жить лучше, становятся здоровее и богаче. Кроме того, программа безракетной индустриализации ближнего космоса придаёт нашей жизни смысл, поскольку открывает путь к достижению трёх главных ценностей – благополучия, здоровья и мудрости.

На конференции присутствует много учёных и уважаемых людей, и я рад, что смог озвучить основную формулу человечества. Признателен вам за вклад в развитие uSpace ради светлого будущего нашей планеты!

Программа безракетной индустриализации ближнего космоса придаёт нашей жизни смысл, поскольку открывает путь к достижению трёх главных ценностей – благополучия, здоровья и мудрости.

Приветственное слово Данилы Медведева,

кандидата экономических наук, прикладного футуролога, специалиста по экологическим решениям и долгосрочному стратегическому планированию

Приветствую участников ежегодной конференции по безракетному освоению космоса!

В настоящее время наша цивилизация проходит через многочисленные революции: социальные, цифровые, интеллектуальные, производственные и экологические. Множество проблем, которые заметили футурологи и другие исследователи ещё полвека назад, требуют решения со всё большей срочностью. Для меня, вошедшего в сферу футурологии на переломе столетий, необходимым источником вдохновения являются уже осуществлённые проекты и детальные комплексные видения будущего.

В связи с этим выражаю благодарность Анатолию Эдуардовичу Юницкому, потому что его воплощённый в железе, а не на бумаге замысел – мощный стимул для инженеров по всему миру, а также способ убедиться, что мечты и фантазии, математически и инженерно проработанные, действительно могут становиться реальностью. Хочется отметить и огромное количество людей, которые поддержали Анатолия Эдуардовича на этом пути.

Сегодня особенно важно смотреть в будущее, а значит, требуются новые модели общественного, технологического и экономического уклада. Рад возможности ознакомиться на конференции с фрагментами этого большого пазла. Свою миссию я вижу в том, чтобы помочь собрать их воедино, используя системный подход в инженерной и научной деятельности. Это позволит нам понять устройство мира будущего и сформировать адекватные стратегии. Надеюсь, что привезу с конференции богатый набор деталей, из которых как футуролог смогу складывать более убедительную, более красивую и более правильную картину грядущего.

Желаю участникам мероприятия увлекательной, плодотворной работы. Делитесь своими мечтами и решениями. Пусть проведённое здесь время будет насыщенным и интересным!

Множество проблем, которые заметили футурологи и другие исследователи ещё полвека назад, требуют решения со всё большей срочностью.

Секция

ГЕОКОСМИЧЕСКИЕ И ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ, ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ И РЕСУРСЫ

УДК 629.7+656.02

Роль струнных технологий в будущей земной, геокосмической и космической логистике

А.Э. Юницкий
доктор философии транспорта

ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

Первобытные люди жили в чаду и в 20 лет умирали от рака лёгких, пока не вынесли огонь и другие простейшие индустриальные технологии из своего дома, пещеры, в окружающую среду – в большой биосферный дом планеты Земля. Сегодня мы в полной мере ощущаем результат последующей технологической эволюции и создания глобальной индустрии (техносферы): биосфера нашей Голубой планеты заполнена технологическим смогом, угрожающим всему живому на Земле.

Перемещение людей и грузов после изобретения колеса около 6000 лет назад стало одной из определяющих технологий для дальнейшего развития человечества. Транспорт, как «кровеносная система» технократической цивилизации, необходим везде и всегда, независимо от внешних и внутренних условий, в том числе во время экономических кризисов, войн, природных и техногенных катаклизмов.

Однако современный транспорт и его логистическая инфраструктура создают всё больше проблем, которые особенно обострились в городах и городских агломерациях, где традиционный транспорт – автомобильный, железнодорожный (включая трамвай и метро, надземное и подземное), монорельс, поезда на магнитной подушке, канатная дорога и др. – не обеспечивает надлежащую логистику, в первую очередь городскую, отвечающую сегодняшним требованиям и вызовам. Низкая средняя скорость движения (около 10 км/ч – на уровне пешехода), многочасовые и многокилометровые пробки, частое снижение скорости до нуля на перекрёстках, светофорах и городских остановках, загазованность воздуха, интенсивный транспортный шум и иные негативные последствия использования устаревших транспортно-инфраструктурных решений постепенно делают города непригодными для комфортного проживания людей.

Ключевые слова:
гравитационная тяга, космическое индустриальное ожерелье «Орбита» (КИО «Орбита»), линейный город, общепланетарное транспортное средство (ОТС), освоение планет и Луны, рельсовый электромобиль, рельсо-струнный транспорт, ЭкоКосмоДом (ЭКД), энергоэффективность, юнимобиль, uST.

Остро назрела необходимость в создании принципиально нового – чистого – транспорта будущего, гарантирующего эффективное и надёжное перемещение пассажиров и грузов при небольшом потреблении энергии, минимизации вредных выбросов и воздействий на окружающую среду при его производстве, эксплуатации и утилизации, а также обеспечивающего повышенный уровень безопасности всех транспортных операций. Комплексный анализ выявил основные требования, предъявляемые к такому транспорту, который должен включать:

- рельсовые беспилотные электромобили на стальных колёсах (юнимобили), имеющие выделенные траектории движения и оснащённые противосходной системой, а также единой системой автоматического управления и обмена дорожными данными;
- предварительно напряжённые рельсовые пути, расположенные на опорах над поверхностью земли, не образующие сплошного дорожного полотна, имеющие точечное опирание на землю, что исключительно важно для высокоскоростного движения без паразитного экранного эффекта, который в два раза увеличивает расход энергии (топлива);
- систему электропитания – бортовую и/или внешнюю (контактную сеть или контактный рельс);
- сопутствующую логистическую инфраструктуру на втором уровне – пассажирские станции, грузовые терминалы, депо, парковки, стрелочные переводы, линейные элементы систем электропитания, связи и автоматизированного управления, иное.

В настоящее время транспортные комплексы, полностью отвечающие вышеприведённым требованиям, уже существуют и успешно работают. Это грузопассажирские комплексы Струнного транспорта Юницкого (uST) – навесные и подвесные, монорельсовые, бирельсовые и квадрорельсовые, городские скоростные и междугородные высокоскоростные, которые с 2015 г. функционируют в ЭкоТехноПарке в г. Марьина Горка (Беларусь) и с 2018 г. – в Центре испытаний и сертификации uSky в Шардже (Объединённые Арабские Эмираты). Кроме того, в 2025 г. в Беларуси введён в эксплуатацию первый коммерческий проект uST – туристическая трасса «Юнилайт».

Использование подвесного uST провисающего типа позволяет ещё на порядок повысить энергоэффективность и снизить стоимость эстакадного транспорта за счёт:

- применения гравитационной тяги (на спуске), гравитационного торможения (на подъёме) и физического (не электрического или механического) рекуператора энергии, функционирующего согласно физическому закону перехода одного вида энергии (потенциальной) в другой вид (кинетическую);
- уменьшения стоимости рельсовых электромобилей, которые в отдельных вариантах исполнения могут иметь самую простую конструкцию – в виде неприводной тележки, скатывающейся с одной горки и закатывающейся по инерции на другую;
- упрощения конструкции путевой структуры благодаря отсутствию необходимости её электрификации;
- уменьшения массы электромобиля и, как следствие, нагрузки на путевую структуру, что в конечном итоге снижает материалоёмкость и стоимость транспортного комплекса в целом (например, тяговые электромоторы с аккумуляторами могут составлять до 50 % массы и стоимости всего электромобиля);
- снижения материалоёмкости и стоимости пролётных строений, а также увеличения допустимого расстояния между опорами благодаря уменьшению массы подвижного состава.

Область применения описанной технологии – городские перевозки, в том числе в линейных городах кластерного типа, перевозка пассажиров и грузов через широкие препятствия (реки, озёра, ущелья, каньоны), а также грузовые трассы в сложном рельефе местности и в экстремальных природно-климатических условиях, где не представляется возможной частая установка опор. Эти решения оптимальны не только для использования на Земле, но и при индустриальном освоении других небесных тел, например Луны.

Человек за сотни лет технологической (индустриальной) эволюции создал на планете техносферу из совокупности множества инженерных технологий, важнейшей из которых является транспорт. Эти индустриальные технологии, в том числе транспорт, в свою очередь обусловили возникновение огромного количества проблем для земной жизни – начиная от изъятия плодородной почвы под строительство дорог и логистической инфраструктуры и заканчивая глобальными экологическими вызовами, включая разрушение озонового слоя, защищающего всё живое от жёсткого ультрафиолетового излучения Солнца.

Для кардинального решения проблем планетарной экологии имеется один-единственный выход. Следует консолидировать усилия человечества для того, чтобы разделить в пространстве земную биосферу, созданную жизнью естественным образом в течение миллиардов лет, и земную техносферу, созданную искусственно внутри неё в течение столетий, предоставив последней экологическую нишу вне биосферы. Такой цивилизационный вектор прогрессивного технологического процесса обеспечит сохранение и развитие жизни на нашей планете по тем законам и направлениям, которые были сформированы в ходе миллиардолетней эволюции, а также откроет возможности для гармоничного взаимодействия общности людей (земной человеческой цивилизации) со своим историческим домом – земной биосферой.

Земную биосферу создал не человек, а совокупность миллиардов видов живых организмов на протяжении миллиардов лет эволюции, где *Homo sapiens* как биологический объект никогда не был доминирующим видом. Поэтому человек не должен доминировать и в будущем, иначе он сломает исторически сложившийся планетарный биосферный генетический код, из поколения в поколение триллионы раз передаваемый для простейших одноклеточных и миллиарды раз – для многоклеточных живых существ, каждый из видов которых насчитывает миллионы, миллиарды и даже триллионы триллионов особей.

На Земле для техносферы нет подходящей экологической ниши, в которой она была бы отделена от биосферы. Но такая ниша есть в ближнем космосе, на высоте 300 км и более, где для большинства технологических процессов, созданных *Homo sapiens*, имеются идеальные технологические условия: невесомость, глубокий вакуум, сверхвысокие и криогенные температуры, неограниченные сырьевые, энергетические и пространственные ресурсы. При этом самым подходящим местом для размещения неживой (мёртвой) техносферы является не космос вообще, где, возможно, также существует жизнь со своей специфической неземной экологией, а мёртвый (неживой) ближний космос, где жизни точно нет – ни земного, ни внеземного происхождения.

Таким образом, мы приходим к выводу о необходимости индустриализации ближнего космоса, сущность которой заключена в главной идее программы «ЭкоМир»: «Земля – для жизни. Космос – для индустрии».

Программа «ЭкоМир» может быть реализована только при наличии энергоэффективного, экологически чистого и безопасного геокосмического транспортно-инфраструктурного комплекса, который будет способен обеспечить индустриальные масштабы грузопассажирского потока в ближний космос и обратно (а это миллионы тонн грузов и миллионы пассажиров в год) при снижении себестоимости перевозок по сравнению с ракетами-носителями не менее чем в 1000 раз.

Ракетно-космическая отрасль не отвечает ни одному из указанных требований. Общий энергетический КПД ракеты-носителя (с учётом всех предполётных и полётных затрат и потерь энергии), работающей на твёрдом или жидком топливе, составляет около 1 %. Геокосмические перевозки посредством ракет всегда останутся чрезвычайно опасными с точки зрения экологии, а их стоимость будет превышать 1 млн USD за каждую тонну доставленного в космос (или обратно) груза. И, что самое главное, в колоссальных объёмах – миллионы тонн за один пуск тяжёлой ракеты – уничтожается озон, защищающий нашу планету от жёсткого космического излучения.

Оптимальная для индустриализации космоса геокосмическая транспортная система должна отвечать фундаментальным законам природы. К их числу относятся четыре физических закона сохранения: энергии, импульса, момента импульса и движения центра масс системы. Вместе с тем конструкция и принцип действия геокосмической транспортной системы должны

встраиваться в окружающую среду с минимальным влиянием на биосферу, гармонично вписываться в природный ландшафт и не вступать в противоречия с локальными и глобальными биосферными процессами.

Только одно известное инженерное решение отвечает заданным параметрам и соответствует целому ряду дополнительных геокосмических транспортно-логистических требований, обусловленных задачами индустриализации космоса, – это общепланетарное транспортное средство (ОТС), ещё в 1982 г. предложенное мировому сообществу советским инженером Анатолием Юницким.

ОТС – работающий на электрической энергии геокосмический транспорт многоразового использования, выполненный в виде самонесущего летательного аппарата, опоясывающего Землю в экваториальной плоскости. За один рейс ОТС можно отправить на орбиту и обратно до 10 млн пассажиров и до 10 млн тонн грузов по цене менее 1000 USD/т, т. е. в тысячи раз дешевле, чем ракетой-носителем.

Будущая космотехногенная земная цивилизация, справившаяся с глобальными экологическими, ресурсными и социально-политическими вызовами на родной планете, будет опираться на три составляющие, призванные обеспечить весь необходимый комплекс условий для устойчивого развития земного человечества, ставшего космическим и сохранившего свой технологический (индустриальный) цивилизационный фундамент:

- БиоМир – биосфера Земли, свободная от антропогенного воздействия, восстановленная и естественно эволюционирующая;
- ТехноМир – преобразованная на Земле и вновь созданная в космосе энерго- и ресурсоэффективная техносфера, не оказывающая антропогенного угнетающего воздействия на биосферу Земли;
- ХомоМир – усовершенствованное мировое общественно-политическое устройство, имеющее как земную, так и космическую (внеземную) составляющую.

Важнейшим элементом обновлённой техносферы Земли станет экваториальный линейный город (ЭЛГ) – земной компонент геокосмического транспортно-коммуникационного комплекса, на территории которого размещена взлётно-посадочная эстакада ОТС со всей инфраструктурой, необходимой для осуществления полётов в космос и обратно, а также для обслуживания глобальных геокосмических грузопассажирских потоков. ЭЛГ представляет собой гармонично вписанные в природную среду наземных и океанических участков планеты поселения кластерного типа, размещённые на полосе вдоль экватора и соединённые между собой скоростными (до 150 км/ч), высокоскоростными (до 360 км/ч), ультраскоростными (до 600 км/ч) и гиперскоростными (более 600 км/ч) трассами uST.
Первый запуск ОТС в околоземное пространство позволит начать создание космического индустриального ожерелья «Орбита» (КИО «Орбита») – транспортно-инфраструктурного и индустриально-жилого орбитального комплекса, являющегося функциональным аналогом ЭЛГ, размещённым в ближнем космосе на экваториальной круговой орбите. КИО «Орбита» будет также служить плацдармом для защиты планеты от космических угроз (в том числе метеоритных) и платформой для будущей экспансии в космос земной цивилизации.

Переход к промышленному освоению космоса не означает полного отказа от индустриального развития на Земле, в том числе от земного транспорта, – подразумевается эволюция существующей земной индустрии до более эффективных, экологически чистых и дружественных земной биосфере технологий, которые будут демонстрировать лучшие показатели качества:

- производство натуральных (органических) продуктов питания – доиндустриальных аналогов, когда сельское хозяйство не знало химических удобрений, ядохимикатов и ГМО;
- производство безотходной «зелёной» электроэнергии без ущерба для биосферы планеты и мировой экономики;
- строительство экологичных (т. е. не отнимающих землю) жилых, промышленных и иных зданий и сооружений;

- создание экоориентированной коммуникационной инфраструктуры – транспортной, энергетической и информационной, размещённой над поверхностью земли (на втором уровне).

Условия для этих преобразований обеспечат технологические платформы, призванные сохранить экологический баланс на планете:

- uGreen – доиндустриальное органическое земледелие;
- uEnergy – «зелёная» энергетика – преимущественно реликтовая солнечная биоэнергетика (РСБЭ);
- Струнные технологии Юницкого (uST);
- EcoHouse – экоориентированное строительство на Земле жилых, производственных и иных зданий и сооружений.

Программа «ЭкоМир» подразумевает трансформацию существующего мироустройства общечеловеческими усилиями. Только вместе, сообща, мы можем изменить характер развития человечества. Наша техногенная цивилизация, все успехи в развитии которой основаны на инженерных технологиях, ни в коем случае не должна отказываться от своего технологического фундамента – индустрии. Деиндустриализация губительна для той цивилизации, которую мы знаем и частью которой мы – всё человечество – сегодня являемся.

Этот проект предполагает консолидацию и цивилизационный патриотизм в общепланетарном масштабе. Традиционные инвестиционные, технологические и социальные риски в таком случае теряют значимость по сравнению с основным риском – потерей времени, необходимого для понимания неизбежности космического вектора индустриального развития как единственно правильного, реализуемого в текущих условиях и на данном этапе эволюции нашей земной техногенной цивилизации, её технологий и науки.

Каждый день промедления приближает нас к неотвратимой глобальной экологической (технобиосферной) катастрофе: не более двух поколений отделяют людей от точки цивилизационного невозврата. Однако у человечества ещё есть выбор: либо продолжать тратить десятилетия на горячие и холодные войны, раздувание финансовых пузырей и создание общемировых кризисов, развитие квазикультуры безудержного потребления и бездуховности, ведущих в цифровой концлагерь, или уже сегодня выбрать альтернативный путь строительства нового цивилизационного будущего и сохранения нашего общего дома – биосферы планеты Земля.

Автор программы «ЭкоМир» инженер Анатолий Юницкий предлагает обоснованные и экономически выгодные инженерно-технические решения, призванные не только спасти биосферу и человечество от деградации, угасания и гибели, но и обеспечить стремительный экономический рост и индустриальный прогресс земной цивилизации, возможно, единственно разумной в нашей бескрайней Вселенной.

Мы объективно не можем отказаться от технологического пути развития, иначе превратимся в чисто биологическую цивилизацию – в муравейник, рой пчёл или стаю дельфинов, у которых нет ни инженерных технологий, ни порождённых ими экономики, науки, искусства, культуры, философии и других социальных проявлений человеческой популяции, опять же обусловленных именно технологическим (читай – индустриальным) вектором развития земного человечества.

UDC 629.7+656.02

The Role of String Technologies in Future Terrestrial, Geocosmic, and Space Logistics

A. Unitsky
Dr. of Philosophy
in Information Technologies
(Transport)

Astroengineering Technologies LLC,
Minsk, Belarus

Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

Primitive technologists lived in harsh conditions while suffering the severe exposure of smoke, succumbing to lung cancer by the age of 20, until they brought fire and other basic industrial technologies out of their caves into the environment – into the vast biospheric home of planet Earth. Today, we fully feel the consequences of technological evolution and the creation of a global industry (the technosphere); the biosphere of our Blue Planet is now permeated by technological smog that threatens all forms of life.

The movement of people and goods, initiated by the invention of the wheel approximately 6,000 years ago, became one of the defining technologies for the development of humanity. Transport, serving as the "circulatory system" of technocratic civilization, is essential at all times and in all contexts, regardless of external and internal conditions, including during economic crises, wars, and natural or man-made disasters.

However, modern transport and its logistical infrastructure are increasingly problematic, especially in cities and urban agglomerations. Traditional transport modes – automobiles, rail systems (trams and metros, both above and below ground), monorails, magnetic levitation trains, cable cars, and others – fail to provide adequate urban logistics to meet today's requirements and challenges. Low average traffic speeds (around 10 km/h at pedestrian level), prolonged traffic jams stretching for many kilometers, frequent reductions in speed at intersections and traffic lights, air pollution, intense traffic noise, and other negative consequences of outdated transport infrastructure gradually render cities less suitable for comfortable living.

There is an urgent need to create a fundamentally new, clean transport system of the future that guarantees efficient and reliable movement of passengers and cargo with low energy consumption, minimizes harmful emissions and environmental impact during production, operation, and disposal,

Keywords:
EcoCosmoHouse (ECH),
energy efficiency,
exploration of planets and the Moon,
General Planetary Vehicle (GPV),
gravitational pull,
Industrial Space Necklace "Orbit" (ISN "Orbit"), linear city,
rail electric vehicle,
string rail transport,
uPod, uST.

and ensures a higher level of safety for all transport operations. A comprehensive analysis has identified the main requirements for such transport, which should include:

- rail driverless electric vehicles on steel wheels (uPods) operating in dedicated traffic lanes and equipped with anti-collision system, as well as a unified automatic control and road data exchange system;
- prestressed rail tracks, located above the ground on supports, not forming a continuous roadbed, but providing point contact on the ground, which is extremely important for high-speed movement without the parasitic airfoil effect that can double energy consumption (fuel);
- power supply system that is either onboard and/or external (such as a contact network or contact rail);
- associated logistics infrastructure at the second level, including passenger stations, cargo terminals, depots, parking lots, turnouts, linear elements for power supply, communication, and automated control systems, and other.

Currently, such transport systems are already in operation and demonstrating success. These include the cargo and passenger complexes of Unitsky String Transport (uST), which encompass suspended, mounted, monorail, bi-rail, and quad-rail technologies, as well as urban rapid and intercity high-speed systems. Since 2015, they have been functioning in the EcoTechnoPark (Maryina Gorka, Belarus) and since 2018 in the uSky Test and Certification Center (Sharjah, United Arab Emirates). Additionally, in 2025, the first commercial uST project, the uLite tourist route, was launched in Belarus.
The implementation of a suspended uST of the sagging type allows for a significant increase in energy efficiency and a reduction in the cost of elevated transport due to:

- the use of gravitational pull on descents and gravitational braking on ascents, along with a physical (rather than electrical or mechanical) energy recuperator, governed by the physical law of converting one form of energy (potential) into another form (kinetic);
- the lowering of the cost of rail electric vehicles, which in some versions can adopt the simplest designs, such as non-driven trolleys that roll down one slope and ascend by inertia up another;
- the simplification of the design of track structure due to the absence of its electrification;
- the decrease of the mass of the electric vehicle and, consequently, the load on the track structure, which ultimately decreases the material intensity and cost of the transport complex as a whole (for example, traction electric motors with batteries can account for up to 50 % of the mass and cost of the entire electric vehicle);
- the reduction of the material intensity and cost of the bridge structures, as well as the increase in the permissible distance between supports due to the decrease in the mass of the rolling stock.

The applications of this technology are diverse, encompassing urban transportation (including in linear cluster-type cities), passenger and cargo transportation across wide obstacles like rivers, lakes, gorges, and canyons, as well as cargo routes in challenging terrains and extreme natural and climatic conditions where frequent installation of supports is impractical. These solutions are optimal not only for use on Earth but also for the industrial development of other celestial bodies, such as the Moon.

Over hundreds of years of technological (industrial) evolution, humanity has created a technosphere consisting of a multitude of engineering technologies, with transport being a key component. However, these industrial technologies have led to numerous challenges for life on Earth. These challenges range from the removal of fertile land for the construction of roads and logistics infrastructure to significant global environmental issues, including the destruction of the ozone layer, which protects all living organisms from the Sun's extreme ultraviolet radiation.

There is only one way to radically solve planetary ecological problems. Humanity must unite to separate the Earth's biosphere, created naturally over billions of years, from the Earth's technosphere, which has been artificially constructed within it over centuries, by providing the latter with an ecological niche outside the biosphere. Such a civilizational vector of progressive technological advancement will ensure the preservation and development of life on our planet according to the laws and directions

formed over billions of years of evolution. It will also provide opportunities for harmonious interaction between the community of people (Earth's human civilization) and its historical home – the Earth's biosphere.

The Earth's biosphere was not created by humans but by a set of billions of species of living organisms over billions of years of evolution, during which *Homo sapiens* as a biological object has never been the dominant species. Therefore, they should not dominate in the future, otherwise, humans can break the historically established planetary biosphere genetic code that has been transmitted from generation to generation trillions of times for the simplest unicellular organisms and billions of times for multicellular organisms, each species of which consists of millions, billions, and even trillions of trillions of individuals.

There is no suitable ecological niche on Earth where the technosphere would be separated from the biosphere, but there is one in near space, at altitudes of 300 km and above, where ideal technological conditions are available for most technological processes created by *Homo sapiens*: weightlessness, deep vacuum, ultrahigh and cryogenic temperatures, as well as unlimited raw materials, energy, and spatial resources. Importantly, the most appropriate location for the inanimate technosphere should not be in space generally, where life with its own specific extraterrestrial ecology may exist, but rather in the dead (nonliving) near space, where life of either terrestrial or extraterrestrial origin is definitively absent.

Thus, we conclude that the near space industrialization is necessary, as exemplified by the central concept of the EcoSpace program: "Earth – for Life. Space – for Industry."

The EcoSpace program can only be implemented with an energy-efficient, environmentally friendly, and safe geocosmic transport and infrastructure complex capable of supporting industrial-scale cargo and passenger transportation to near space and back (amounting to millions of tons of cargo and millions of passengers per year) while reducing transportation costs compared to launch vehicles by at least 1,000 times.

The rocket and space industry does not meet any of these requirements. The overall energy efficiency factor of a launch vehicle (considering all prelaunch and in-flight energy expenditures and losses) operating on solid or liquid fuel is about 1 %. Geocosmic transportation via rockets will always remain extremely dangerous in terms of ecology, and the cost will exceed 1 mln USD for each ton of cargo delivered to space (or back). Most importantly, the ozone layer that protects our planet from harsh cosmic radiation is being destroyed in colossal volumes – millions of tons per launch of a heavy rocket.

An optimal geocosmic transport system for the industrialization of space must adhere to fundamental laws of nature. These include the four physical conservation laws: energy, momentum, angular momentum, and the motion of the system's center of mass. Additionally, the design and principle of the geocosmic transport system operation should integrate into the environment with minimal impact on the biosphere, harmoniously fitting into the natural landscape and not conflicting with local and global biospheric processes.

Only one known engineering solution meets these criteria and aligns with a range of additional geocosmic transport and logistics requirements dictated by the tasks of space industrialization: The General Planetary Vehicle (GPV) proposed to the global community by Soviet engineer Anatoli Unitsky back in 1982.

The GPV is a reusable geocosmic transport system powered by electric energy, designed as a self-supporting spacecraft that encircles the Earth in the equatorial plane. In a single flight, the GPV can send up to 10 mln passengers and up to 10 mln tons of cargo to orbit and back at a cost of up to 1,000 USD/t, which is thousands of times cheaper than using a launch vehicle.

The future cosmotechnogenic terrestrial civilization, which has addressed global ecological, resource, and sociopolitical challenges on its home planet, will rely on three components designed to ensure the necessary conditions for the sustainable development of humanity, which has become a spacefaring species while preserving its technological (industrial) civilizational foundation:

- BioSpace – the Earth's biosphere, free from anthropogenic impact, restored, and naturally evolving;

- TechnoSpace – an energy- and resource-efficient technosphere transformed on Earth and newly created in space, which does not have an anthropogenic oppressive impact on the Earth's biosphere;
- HomoSpace – an improved global sociopolitical system that includes both terrestrial and cosmic (extraterrestrial) components.

A crucial element of the renewed technosphere on Earth will be the Equatorial Linear City (ELC) – the terrestrial component of the geocosmic transport and communication complex, hosting the GPV takeoff and landing overpass with all the infrastructure necessary for carrying out GPV flights and servicing global geocosmic cargo and passenger flows. The ELC will consist of cluster-type settlements harmoniously integrated into the natural environment across terrestrial and oceanic areas, located on the band along the equator and connected by rapid (up to 150 km/h), high-speed (up to 360 km/h), ultrahigh-speed (up to 600 km/h), and hypervelocity (over 600 km/h) routes of uST.

The first launch of the GPV into space will initiate the creation of the Industrial Space Necklace "Orbit" (ISN "Orbit") – a transport and infrastructure, industrial and residential orbital complex serving as a functional analogue to the ELC, located in near space on an equatorial circular orbit. The ISN "Orbit" will also serve as a platform for protecting the planet from cosmic threats (including meteorite impacts) and as a base for the future expansion of Earth's civilization into space.
The transition to industrial space exploitation does not imply a complete abandonment of industrial development on Earth, including terrestrial transport; rather, it indicates the evolution of existing terrestrial industry towards more efficient, eco- and biosphere-friendly technologies that will demonstrate better quality features:

- production of natural (organic) food products, i.e., preindustrial analogues that existed when agriculture did not use chemical fertilizers, pesticides, and GMOs;
- generation of waste-free green electricity without harming the planet's biosphere or global economy;
- construction of eco-friendly residential, industrial, and other buildings that do not consume land;
- creation of transport, energy, and informational eco-oriented infrastructure above the Earth's surface at the second level.

Technological platforms will provide the conditions for these transformations, aimed at maintaining ecological balance on the planet:

- uGreen – preindustrial organic farming;
- uEnergy – green energy mainly represented by relict solar bioenergy (RSBE);
- Unitsky String Technologies (uST);
- EcoHouse – eco-oriented construction of residential, industrial, and other buildings and structures on Earth.

The EcoSpace program envisions a change in the existing world order through universal human efforts. Only together, collectively, can we alter the trajectory of humanity's development. Our technogenic civilization, whose achievements are rooted in engineering technologies, must not abandon its technological foundation – industry. Deindustrialization is detrimental to the civilization we know and to which we all – humanity as a whole – belong today.
This project envisions consolidation and civilizational patriotism on a planetary scale. In this case, traditional investment, technological, and social risks lose significance compared to the primary risk – the loss of time necessary to understand that the cosmic vector of industrial development is the only correct inevitable solution that can be implemented under the current conditions and at the present development stage of our Earth's technogenic civilization, its technologies and science.

Each day of delay brings us closer to an unavoidable global ecological (technobiospheric) catastrophe: no more than two generations separate people from a point of civilizational no return. However, humanity still has a choice: to continue wasting decades on hot and cold wars, inflating financial bubbles, creating global crises, and nurturing a quasi-culture of unrestrained consumption and spiritual emptiness leading to a digital concentration camp, or to choose today an alternative path toward building a new civilizational future and preserving our shared home – the biosphere of planet Earth.

The author of the EcoSpace program, engineer Anatoli Unitsky, proposes reasonable and economically viable engineering solutions aimed not only at saving the biosphere and humanity from degradation, extinction, and demise but also at ensuring rapid economic growth and industrial progress for Earth's civilization, which may be the only intelligent one in our vast Universe.

We cannot objectively abandon the technological path of development; otherwise, we will become purely biological civilizations – like ant colonies, swarms of bees, or pods of dolphins, devoid of engineering technologies, economics, science, art, culture, philosophy, and other social manifestations of the human population, all of which are fundamentally shaped by the technological (i.e., industrial) vector of human development on Earth.

Земля – для жизни.
Космос – для индустрии.

Введение

Становлению человечества сопутствует совершенствование транспортных технологий. Заселяются необжитые территории, делаются открытия, осваиваются неизвестные ранее ресурсы. Однако территории конечны, ресурсы не безграничны, а стремление к открытиям не имеет пределов. Люди изобретают более рациональные способы расселения, конструируют и производят новые виды транспорта.

Появление транспорта, т. е. возможности перемещения людей и грузов с помощью технических решений, исторически стало фундаментом зарождения и развития нашей индустриальной (инженерной) земной цивилизации. Вполне вероятно, что ошибки в оценке перспектив развития транспорта, включая геокосмический, могут стать одной из основных причин гибели человечества, в частности путём деиндустриализации (уничтожения инженерных достижений в мировой экономике), в том числе и в транспортно-инфраструктурных отраслях.

Трудно переоценить влияние, которое оказывает быстрорастущая транспортная отрасль на экологическую и социальную сферы общественной жизни земной цивилизации, избравшей путь технологического (технократического, техногенного, индустриального, инженерного) развития ещё более миллиона лет назад, когда древний человек зажёг свой первый костёр [1].

Быстрый рост важнейшей для мировой экономики транспортной индустрии обусловлен сегодня не только увеличением численности населения планеты, но и прогрессирующей урбанизацией и индустриализацией, а также процессами, связанными с ними, в первую очередь усиливающейся глобализацией промышленных связей между странами и континентами.

При этом воздействие транспорта на земную природу и общество не может рассматриваться только с позиций роста количества транспортных средств, прежде всего автомобилей, число которых давно превысило миллиард, и интенсификации грузо- и пассажироперевозок. Нужно учитывать и растущее влияние на окружающую среду всех сопутствующих логистических и инфраструктурных элементов (дорожное полотно и рельсошпальные решётки, земляные насыпи и выемки, щебёночные и песчаные подушки, тоннели, мосты и путепроводы, линии электропередач и контактных сетей, станции, вокзалы и грузовые терминалы, многоуровневые дорожные развязки) и самих транспортных средств (вопросы их производства и утилизации по завершении жизненного цикла), а также воздействие нефтеперерабатывающих заводов, электростанций, нефтяных скважин и нефтепроводов, карьеров, шахт и рудников по добыче минеральных и энергетических ресурсов, необходимых для обеспечения устойчивого функционирования мировой транспортно-инфраструктурной отрасли.

Вследствие относительно неограниченных пространств для движения морских и воздушных судов ещё не обострились проблемы насыщения поверхностей морей и океанов, толщи земной атмосферы плавающими и летающими транспортными средствами, а также логистическими коридорами и маршрутами. Однако наземный транспорт приблизился к той точке, когда дальнейшее увеличение количества транспортных средств (легковые и грузовые автомобили, автобусы и трамваи, тепловозы и электровозы, пассажирские и грузовые вагоны и др.), интенсификация их использования и расширение площадей инфраструктурных сооружений приведут к катастрофическому воздействию на все биосферные компоненты планеты (воздух, почва и вода), а также на экономическое развитие, уровень и качество жизни, социальные аспекты отдельных стран и земной цивилизации в целом.

Дороги, мосты, путепроводы, развязки, водопропускные системы и другие дорожные объекты уже изъяли у истинного землепользователя – земной биосферы – почву на территории, равной площади шести таких стран, как Беларусь [1]. Причём прилегающие к дорогам и транспортной инфраструктуре земли деградированы относительно исходного природного состояния на значительно большей территории, равной площади 50 Великобританий.

Говоря о будущем человечества, ни в коем случае нельзя игнорировать значение создания и практической масштабной реализации эффективных и экологически чистых транспортно-инфраструктурных технологий, способных поддержать устойчивое развитие нашей бурно растущей техногенной цивилизации при сведении к минимуму воздействия земной индустрии на окружающую природную среду.

Важно определить, на решении каких транспортно-логистических задач предстоит сосредоточить основные инженерные усилия, комплексно оценить перспективы применения методов и технологий, которые нам уже известны сегодня и, более того, частично присутствуют в транспортной отрасли планеты. Учитывая, что вредная часть земной индустрии рано или поздно будет вынесена в космос,

необходимо обеспечить её геокосмической логистикой, имеющей следующие структурные элементы:

- земная составляющая (грузопассажирские перевозки на земной части цепочек поставок сырья, продукции и персонала);
- геокосмическая трасса «Земля – Космос – Земля»;
- логистика между орбитальными объектами индустрии;
- логистика на индустриально осваиваемых человеком планетах Солнечной системы и ближайшем естественном спутнике Земли – на Луне.

Задачей настоящего исследования является формулировка комплекса требований к транспортным системам будущего и анализ того, в какой мере данным требованиям отвечают решения, которые используются в транспортной отрасли или начнут использоваться в обозримой перспективе.

Горизонт анализа не должен выходить за ближайшие 40–50 лет. Именно в этот период для обеспечения устойчивого цивилизационного развития земного технократического человечества на длительную перспективу – на тысячи и даже миллионы лет вперёд – необходимо принять кардинальные меры по улучшению логистики (мобильности) на всех континентах планеты, между планетой и ближним космосом, на земной орбите, других планетах и небесных телах (в том числе на Луне).

При этом следует свести к минимуму сопутствующие негативные факторы, которые могут вызвать транспортный коллапс в любой из перечисленных выше логистических цепочек, а также резкое увеличение техногенных аварий и катастроф, приводящих к гибели и увечью миллионов людей и миллиардов животных [2, 3].

Главным критерием должно стать понимание того, что транспорт, включая геокосмический, не нанесёт ущерба земной биосфере – общему дому миллиардов видов живых существ на нашей планете, в том числе человечества, биомасса которого на самом деле ничтожна мала – менее 0,01 % от всей биосферной биомассы. Цена ошибки при принятии концептуальных транспортно-логистических решений становится необычайно высокой для всей земной жизни.

Наличие на Земле мест, городов и даже стран, где транспортные проблемы уже сегодня критически сказываются на способности общества и правительств обеспечить нормальное проживание и развитие, говорит о том, что точка невозврата может быть пройдена в ближайшие 20–25 лет, а значит, времени на адекватное реагирование остаётся с каждым днём всё меньше и меньше. О каком вынесении индустрии в космос может идти речь, если человечество не в силах справиться даже с более простыми земными транспортно-логистическими проблемами?

Логистика на планете Земля

Требования к земному транспорту

Рост численности мирового населения, протяжённости сети дорог, количества транспортных средств и масштабности стоящих перед земной цивилизацией транспортно-логистических задач, безусловно, ведёт к расширению транспортной инфраструктуры – к увеличению её стоимости и ресурсоёмкости.

Ресурсоёмкость – это не только расход металла, полимеров, бетона, асфальта и щебня при строительстве автомобильных и железных дорог, мостов, многоуровневых развязок и при изготовлении подвижного состава, но и потребление топлива (энергии) в процессе возведения и эксплуатации транспортных коммуникаций, изъятие миллиардов тонн кислорода из земной атмосферы при работе двигателей внутреннего сгорания (ДВС) автомобилей, кораблей, самолётов и иных транспортных средств, а также разрушение защитного озонового слоя планеты как продуктами горения топлива наземного транспорта, так и высокотемпературными и высокоскоростными реактивными и турбореактивными струями ракет-носителей и стратосферной авиации. Это ещё и нарушение природного рельефа местности земляными насыпями и выемками, карьерами для добычи песка и строительного грунта. Это также блокировка свободного перемещения диких и домашних животных, движения поверхностных и грунтовых вод, когда с одной стороны низконапорной грунтовой плотины, каковой является уплотнённая относительно естественного залегания дорожная земляная насыпь, образуется болото, а с другой – пустыня. Это и загрязнение прилегающих территорий транспортными отходами: продуктами горения топлива, износа автомобильных шин и асфальта, антиобледенительными солями. А ведь чистые вода, воздух и почва – важнейший биосферный ресурс планеты.

Кроме того, огромная часть земли отчуждается под дороги и логистическую инфраструктуру. Как отмечалось выше, на планете «закатана» в асфальт и «похоронена» под шпалами площадь суши, причём с самой лучшей почвой, равная территории шести таких стран, как Беларусь. Сколько суши нужно ещё изъять у земной биосферы, чтобы решить будущие транспортно-инфраструктурные проблемы быстрорастущей техногенной цивилизации – 10 Японий, 30 Греций, 50 Австрий?

Не получится «железной рукой загнать человечество в счастье», как это пытались осуществить коммунисты в Советском Союзе и что реально пытаются сделать евробюрократы и чиновники «от экологии», взявшие курс на деиндустриализацию, декарбонизацию, десоциализацию и депопуляцию нашей цивилизации, что не только не способствует преодолению серьёзных вызовов современности, но и в конечном итоге может привести к глобальному цифровому концлагерю и цифровому фашизму [3].

Для того чтобы быть успешным, новый чистый транспорт обязан как урегулировать проблемы экологии и климатических изменений, так и, что намного важнее, решить социально-экономические вопросы, связанные с необходимостью обеспечить мобильность людей и грузов для нужд нашей быстрорастущей индустриальной цивилизации, а также с безопасностью и комфортностью проживания на планете Земля, а в будущем – на орбите и других планетах. Причём это будущее на самом деле находится от нашего настоящего гораздо ближе, чем от времён того же Джорджа Стефенсона, детищем которого – железной дорогой – мы пользуемся до сих пор. Правда, изобретатели XIX в. не заглядывали на столетия вперёд, но мы, живущие в XXI в., поняв, что не получили Землю в наследство от наших предков, а взяли её в долг у наших потомков, просто обязаны заглядывать в будущее хотя бы лет на сто.

Главными социально-экономическими проблемами, которые в области транспорта имеются сейчас и которые земному человечеству предстоит решать в ближайшее время, являются, несомненно, растущее количество транспортных происшествий, аварий и катастроф и связанные с ними случаи гибели, увечий и ранений людей и животных, а также транспортные заторы, не только тормозящие экономическое развитие городов, регионов и стран, но и оказывающие негативное влияние на природную среду и качество жизни.

Прежде всего необходимо обеспечить безопасность транспортных комплексов, транспортных средств и систем управления. Нет ничего более ценного, чем жизнь и здоровье человека. Современный транспорт на первом уровне (автомобильные и железные дороги) ежегодно убивает свыше миллиона человек и миллиарды мелких и крупных животных, как диких, так и домашних. Это работающая в три смены «фабрика» по производству более 20 млн инвалидов и калек ежегодно, а значит, и поломанных человеческих судеб в ещё большем количестве, поскольку страдают и члены семей потерпевших.

Сокращение аварийности на наземном транспорте хотя бы до уровня авиационных перевозок (в авиакатастрофах ежегодно в мире гибнут 300–500 человек) спасёт в XXI в. более 100 млн (!) человек от гибели и более 1 млрд (!) – от травм и инвалидности [4]. Сотни миллионов людей сохранят здоровье, работоспособность, возможность содержать семью, платить налоги, быть активными членами общества.

Если новый чистый транспорт не будет хотя бы на порядок безопаснее, чем тот, что мы имеем сегодня, то какой смысл предотвращать грядущие климатические проблемы, имея фактически происходящий в режиме 24/7 геноцид человеческой популяции на дорогах планеты?

Для того чтобы кардинально сократить количество аварий, требуется исключить человеческий фактор из систем безопасности. Во-первых, управление транспортными комплексами должно быть полностью автоматизированным, а все транспортные средства – беспилотными. Во-вторых, необходимо перенести с поверхности земли, где сосредоточена практически вся жизнь и осуществляется производственная деятельность, на второй уровень движение подвижного состава, причём по чётко обозначенным путевым структурам, построенным с точностью до миллиметров. Это исключит появление на его пути других транспортных средств, людей, животных, природных и техногенных препятствий. В-третьих, следует устранить даже минимальную возможность столкновения и схода подвижного состава с путевой структуры, оснастив все транспортные средства надёжной противосходной системой. Таким образом, необходимость переноса транспортного трафика в геометрически чётко очерченное пространство над поверхностью земли (или под землю) очевидна.

Кроме того, актуальна проблема дорожных заторов. Это то, с чем практически каждый житель планеты сталкивается каждый день, причём по нескольку раз. Это то, что заставляет нас нервничать, опаздывать, менять работу, переезжать, снимать другую квартиру или дом. Стоит только представить, сколько полезных дел человек мог бы сделать за те часы, которые он теряет ежедневно в дорожных заторах (а за всю свою жизнь – не менее года), сидя в автобусе, трамвае, личном автомобиле и вдыхая выхлопные газы и испарения перегретого асфальта. В масштабах региона или страны часы, потраченные людьми впустую, вычитаются из рабочего времени или времени, предназначенного для полезного отдыха. В итоге существенно падает средняя производительность труда и затормаживается общее экономическое развитие.

Задержки с доставкой грузов только усугубляют проблемы, создаваемые транспортом. Количество автомобилей на дорогах растёт так стремительно, что строительство новых трасс, мостов, тоннелей и многоуровневых развязок не сможет улучшить положение, а лишь отложит на какое-то время наступление полного дорожного коллапса.

По данным, озвученным на Мировом экономическом форуме, количество автомобилей (бензиновых и электрических) к 2040 г. удвоится [5]. Значит, чтобы ситуация осталась на нынешнем уровне (скажем прямо, неприемлемом), все дороги в последующие 15 лет должны быть расширены в два раза. Вместе с тем необходимо построить такое же количество дорожных развязок, которое имеется сегодня. Однако, во-первых, это невозможно в силу ряда причин, преимущественно экономических и ресурсных, а во-вторых, ущерб экологии и природе от таких предложений может не только стать критическим, но и похоронить все надежды человечества на предотвращение климатических изменений, в том числе глобального потепления.

Важно понимать, что административными мерами, связанными с отчуждением полос движения под отдельные виды транспорта, введением запретов на движение в определённых районах, созданием велосипедных и пешеходных дорожек и тому подобными полумерами, невозможно устранить несоответствие имеющихся площадей дорожного полотна и растущего в геометрической прогрессии количества транспортных средств (в том числе электрических автомобилей и автобусов). Всё перечисленное может дать лишь видимость решения проблем, но, что очевидно, не исключит их.

Это ещё раз подчёркивает необходимость использовать для экологически чистого транспорта иное пространство, а не поверхность земли, уже и так почти полностью занятую под дороги и транспортную инфраструктуру. Поскольку человечество пока не научилось проникать в третье измерение и создавать временные порталы, то речь может идти только о пространстве над поверхностью земли (или под землёй). Такой подход настолько очевиден, что не требует каких-либо дополнительных доказательств.

Здесь уместно отметить главное: для любых преобразований, особенно для глобальной перестройки земной транспортной индустрии, нужны огромные средства и ресурсы – финансовые, пространственные, минеральные и энергетические.

Известные системы надземного (эстакадного) и подземного (тоннельного) транспорта стоят безумно дорого, они чрезмерно материалоёмки, энергетически малоэффективны, поэтому только немногие страны могут осуществить реализацию таких масштабных проектов, как надземные автодорожные или железнодорожные эстакады, поезда на магнитной подушке, монорельсовые системы, тоннели, современные мостовые переходы, пространственно расположенные либо высоко, либо глубоко. Даже для стран «золотого миллиарда» подобные проекты требуют огромных финансовых усилий, ограничивающих возможности решения назревших транспортных проблем. Что же тогда говорить об остальном мире? Санто-Доминго, Каракас, Бангкок, Улан-Батор и Джакарта стоят в многокилометровых пробках, задыхаются в выхлопных газах и лидируют по числу аварий и смертей на дорогах [6].

Пришло время наконец всем осознать, в первую очередь политикам и правительствам стран, что планета Земля – это наш общий дом и жизнь каждого человека одинаково бесценна. Разделение стран на условно благополучные и остальные уже сыграло негативную роль в развитии цивилизации и отрицательно сказалось на экологии и климате. По данным МВФ, развивающиеся страны сегодня гораздо больше других страдают от воздействия климатических изменений и менее приспособлены к решению связанных с этим проблем [7].

Почему бы вместо демонстративных подачек и попыток слепо копировать то, что делается в странах «золотого миллиарда» (кстати, не забывая на этом зарабатывать), не начать с предоставления развивающимся странам инновационных и одновременно доступных (недорогих, простых и безопасных) транспортно-инфраструктурных технологий, которые способны незамедлительно урегулировать множество транспортно-логистических, экономических и социальных проблем? Тем самым можно обеспечить выравнивание планетарного уровня развития, улучшение глобальной экологической обстановки и в конечном счёте сохранение природных климатических параметров нашей планеты, сложившихся исторически в течение миллиардов лет эволюции жизни.

Таким образом, при определении транспортно-инфраструктурных технологий будущего необходимо учитывать их доступность, степень развития и, главное, действительное их наличие на рынке, а не только в виртуальной реальности. Для этого важно сформулировать понятие экологически чистого транспорта с цивилизационных позиций, а не, например, в интересах бизнеса или политики. Следует обозначить чёткие требования к транспортно-инфраструктурным решениям. Причём транспорт, а тем более будущий, нельзя отделять от других социально-экономических составляющих техногенной цивилизации, таких как достойное и комфортное проживание в естественной природной среде; наличие и доступность рабочих мест; соблюдение всех видов цивилизационной безопасности – коммуникационной (транспорт, передача электрической энергии и информации), инфраструктурной, продовольственной, демографической, ресурсной, минеральной, энергетической, экологической, биологической (чистые вода, воздух и почва – какими они были изначально на планете в доиндустриальную эпоху); др.

Кроме того, подобный логистический комплекс, дружественный земной биосфере, должен отличаться от существующих систем высокой энергоэффективностью и производительностью, низкой материалоёмкостью, возможностью безопасного применения беспилотного управления, а также располагаться на втором уровне (над поверхностью земли) и характеризоваться небольшой величиной капитальных затрат на строительство и операционных затрат на эксплуатацию.

«Зелёный» биосферный транспорт – основа решения экологических, экономических и социальных проблем цивилизационного развития

Многие эксперты обеспокоены выбросами углекислого газа в атмосферу, которые, по некоторым оценкам, уже вызвали климатические изменения и, соответственно, отрицательное воздействие на флору и фауну практически всей планеты. Причём поиск источника вредных выбросов, так называемого карбонового следа, привёл не только к пониманию, что бензиновый и дизельный транспорт – это плохо, а электрический транспорт – это хорошо, но и к идее, что и само человечество, и сельское хозяйство будто бы представляют собой ещё большую опасность для природы. Например, якобы корова экологически опаснее, чем автомобиль, так как она выделяет слишком много парниковых газов, поэтому необходимо введение карбонового налога [3]. Однако исследования, осуществлённые автором настоящей работы, показали, что парниковый эффект в первую очередь обусловлен водяным паром в атмосфере планеты [8]. Более того, демонизируемый в последнее время антропогенный CO_2 совершенно безопасен для биосферы и не только не является избыточным, но даже не восполняет карбоновый дефицит (около 300 млрд тонн) в земной атмосфере.

Нужно помнить, что сухое вещество любого организма (без учёта кислорода и водорода, входящих в состав воды каждой живой клетки) примерно на 60 % состоит из углерода – главного химического элемента земной жизни, включая человека. Пищевая цепочка для углерода начинается именно в атмосфере, где он должен присутствовать в достаточном количестве с точки зрения эволюции живой биосферы, а не мёртвой техносферы, созданной человеческой техногенной цивилизацией, или искусственного интеллекта, которому биосфера вообще не нужна.

Значит, экологическую проблему образует не углеродный след, обусловленный существующим транспортом, а канцерогены, связанные со сжиганием грязного топлива, содержащего тяжёлые металлы, серу и другие химические вещества, в грязном (с позиции процессов чистого химического горения) воздухе, содержащем не только 78 % азота, но и в малом количестве практически всю таблицу Менделеева. Однако если сжигать химически чистое топливо (метан, спирт и иные углеводороды, включающие водород, кислород и углерод) в чистом кислороде (для чего, например в автомобиле, должен быть второй бак с кислородом), то данный транспорт станет экологически чистым, поскольку в выхлопных газах будут присутствовать лишь углекислый газ и пары воды.

Следовательно, полная электрификация транспорта не является панацеей в решении глобальных экологических проблем в будущем. Наоборот, повсеместная электрификация только усугубит их, так как потребуется сжигать ещё большее количество грязного первичного топлива в грязном биосферном воздухе на тепловых электростанциях, что обусловлено большими дополнительными потерями энергии в цепочке поставок электрической энергии в каждое транспортное средство: генератор электростанции – повышающий трансформатор – высоковольтная линия электропередач – понижающий трансформатор – контактная сеть (зарядная станция) – двигатель транспортного средства.

В связи с этим нужно не переходить на электрическое питание, а создавать инновационный транспорт, который будет потреблять в разы меньше энергии (не важно какой – топлива или электричества). Тогда значительно меньше понадобится и первичной энергии (топлива) для выполнения одних и тех же транспортных задач.

Очевидно, что в планетарном масштабе выбросы CO_2 и всевозможных вредных газов и веществ, в составе которых более 100 канцерогенов, связаны с работой двигателей автомобилей, кораблей и самолётов в меньшей степени, чем со сжиганием угля, мазута и газа в тепловых электростанциях, котельных, металлургических домнах, химических реакторах и в ходе других индустриальных теплотехнических процессов не только для получения электрической и тепловой энергии, но и при выплавке стали, производстве полимеров, новых материалов, композитов и веществ.

Так, по данным Международного энергетического агентства, при сжигании угля для производства электроэнергии образуется почти половина от всех остальных выбросов углекислого газа, а в 2021 г. выбросы CO_2, связанные с выработкой электроэнергии и промышленными процессами, выросли на 6 % и достигли рекордных за всё время наблюдений величин [9]. Таким образом, уменьшение загрязнения должно быть обеспечено не только и не столько

путём простой замены автомобилей с ДВС на электромобили, сколько критическим повышением энергоэффективности транспортных систем, причём не на проценты, а в разы, вне зависимости от вида используемой ими энергии.

Следующим фактором, практически убивающим окружающую среду и влияющим на возможные климатические изменения, является необходимость строительства новых дорог и дорожных сооружений. Это вызывает массовое изъятие из природного оборота и «закатывание» в асфальт, бетон, под шпалы и рельсы миллиардов всё новых и новых квадратных метров почвы. Земляная насыпь, возведённая для традиционных автомобильных и железных дорог, и выемки приводят к созданию искусственных барьеров и разделительных преград для миграции животных, разрушают природные водотоки (поверхностные и грунтовые), перерезают истоки рек, что становится причиной, особенно на косогорах, заболачивания значительных территорий с одной стороны и опустынивания с другой стороны низконапорных грунтовых плотин, в которые превращаются такие дороги. В транспортных коридорах осуществляется вырубка деревьев, уничтожаются плодородные почвы и сложившиеся в течение миллионов лет природные экосистемы сообществ мелких животных, насекомых и микроорганизмов.

Любой протяжённый инфраструктурный объект нарушает хрупкое природное равновесие и так или иначе негативно влияет на флору, фауну и ландшафт места возведения. Например, мостовой переход через реку, несомненно, изменяет её русло, что в дальнейшем отрицательно скажется на локальном биопространстве. Можно упомянуть и такой факт: асфальт, бетон, земляная насыпь, щебёночная подушка железной дороги являются гигантскими аккумуляторами тепловой энергии массой в миллиарды тонн, захватившими биосферные территории в триллионы квадратных метров. Это они нагреваются на солнце днём на десятки градусов и не позволяют воздуху охладиться ночью, чтобы на следующий день нагреться ещё сильнее. Если что-то и влияет на глобальное потепление, то, скорее всего, эта тепловая транспортно-инфраструктурная спираль, а не так называемые парниковые газы, производимые организмами коров, демонизированных апологетами глобального потепления.

Рост численности мирового населения, увеличение количества транспортных средств и масштабности транспортно-логистических задач, стоящих перед земной цивилизацией, несомненно, ведут к наращиванию объёмов и размеров элементов транспортной инфраструктуры. Невозможно в одно мгновение изменить вектор развития нашей транспортно-инфраструктурной цивилизации, начавшийся со строительства пирамид, акведуков, римских дорог и древних городов. Однако требуется максимально снизить ресурсоёмкость транспортно-инфраструктурных сооружений, их воздействие на ландшафт, почву, климат, растительность и животный мир, как локально, так и глобально – в масштабах всей планеты. Без этого земная биосфера вскоре потеряет джунгли Амазонки и леса тропических островов Индонезии, сибирскую тайгу и нетронутые степи Средней Азии, которые уже активно осваиваются экономиками в связи с объективной необходимостью создания масштабных транспортных коридоров. Последующие климатические изменения, какими бы они ни были, примут такой же глобальный масштаб и завершатся всеобщей климатической катастрофой, которую трудно описать или смоделировать.

Сложность внедрения чистых транспортных решений определяется ещё и тем, что наряду с урегулированием вопроса многократного снижения воздействия на окружающую среду нельзя пренебречь экономическими и социальными аспектами транспортно-инфраструктурной отрасли, основанной на инновационных инженерно-технологических принципах. Для того чтобы реально осуществить переход к новому чистому транспорту, не следует ставить экологичность выше его экономической и социальной целесообразности, безопасности и удобства пользования всеми жителями планеты. Иначе такой транспорт придётся продвигать принудительно, используя бюрократические правила и запреты вопреки воле и интересам общества. Уже сейчас мы видим такие тенденции в странах Запада, где директивно насаждаются электромобили, ветряные и солнечные электростанции. Исторически доказано, что подобные добровольно-принудительные начинания, в том числе под эгидой «зелёной дубинки», обречены на провал.

У развивающихся стран Азии, Африки и Америки, где проживает основная часть населения нашей планеты, априори нет средств на кардинальное решение транспортных проблем и создание якобы усовершенствованных, чистых, экологичных и умных пассажирских и грузовых транспортно-инфраструктурных комплексов, но, как известно, столетней технологической давности. Более того, если говорить о глобальных вопросах экологии и климатических изменений, то не получится урегулировать проблему одних за счёт других, отгородиться визовыми барьерами, отделаться подачками в виде финансовых грантов и ограниченных спонсорских программ.

Законы физики и энергоэффективность транспорта

Транспорт – это движение, а движение – это энергия. Значит, энергоэффективность является ключевым показателем любых транспортных систем, от которой зависит и их экономическая эффективность, в том числе стоимость транспортной услуги.

Затраты энергии при перемещении могут быть как полезными (необходимы для выполнения транспортной работы), так и паразитными (обусловлены, в частности, сопротивлением движению), причём именно их соотношение определяет важную энергетическую характеристику всех механических систем – коэффициент полезного действия.

Комплексный анализ показывает, что КПД каждой наземной транспортной системы, как ни парадоксально, равен нулю. Это видно из следующего примера. Совершим мысленное кругосветное путешествие из произвольной точки *A*. Транспортное средство, независимо от своего вида (гужевой, автомобильный, железнодорожный, авиационный, поезд на магнитной подушке, морской или космический корабль, гипотетический антигравитационный корабль и др.), вернувшись в точку *A*, согласно физике не совершило никакой полезной работы. Мы оказались в исходном положении: на той же высоте H_A над уровнем моря (т. е. имея ту же изначальную потенциальную энергию $E_п = mgH_A$) с нулевой скоростью V_A относительно поверхности Земли (т. е. имея ту же изначальную кинетическую энергию $E_к = mV_A^2/2$, равную нулю).

Поскольку потенциальная и кинетическая энергия транспортируемого груза не изменилась в результате кругосветного путешествия, то полезная транспортная работа также будет равна нулю. На путешествие затрачено достаточно много энергии, однако КПД транспортной системы всё равно окажется нулевым, ведь если разделить ноль (полезная работа) на затраченную энергию, то получим ноль, причём независимо от времени путешествия, вида транспорта и расхода энергии (топлива).

Куда же пошла энергия, если не на полезную работу? Ответ прост: вся энергия (100 %) в любой наземной транспортной системе используется не на полезную работу, а на борьбу с окружающей средой и её разрушение, т. е. на генерацию тепла, выхлопных газов, шума, вибраций, деформаций, на износ дорожного полотна, рельсов, колёс, тормозных колодок и др. Разрушение тем интенсивнее, чем выше скорость движения.

Из сказанного следует очевидный, но важный вывод: поскольку ноль нельзя улучшить, то совершенствование любой наземной транспортной системы должно заключаться в снижении потерь энергии на борьбу с окружающей средой и её разрушение, т. е. в повышении экологичности транспортной услуги.

Энергия расходуется на функционирование двигателя и движителя транспортного средства, а также на преодоление сопротивления его движению. Электрический двигатель предпочтительнее благодаря высокому КПД (90 % и более), тогда как у ДВС он не дотягивает и до 40 %. Отдельно нужно отметить недостаток линейного электродвигателя: КПД у него не лучше, чем у ДВС, из-за высокого воздушного зазора между линейным ротором и линейным статором (10 мм и более, в то время как в традиционном электродвигателе вращения зазор между ротором и статором составляет десятые доли миллиметра), где в магнитном поле и теряется более половины энергии, затрачиваемой на движение.

Именно линейный электродвигатель, являющийся движителем в поездах на магнитной подушке, перечёркивает все преимущества магнитного подвеса – выигрыш в затратах энергии для транспортного средства мизерный, зато потери в двигателе значительные (не случайно, например, поезд на магнитной подушке Transrapid по энергоэффективности уступает даже такому неэффективному транспорту, как самолёт). Воздушная подушка ещё менее энергоэффективна, поэтому не рассматривается в дальнейшем анализе из-за технико-экономической нецелесообразности.

Механическое опирание подвижного состава на путь (например, через колесо) по сравнению с опиранием на воздух (самолёт, вертолёт, судно на воздушной подушке) или электромагнитное поле (электромагнитная или электродинамическая подушка) предпочтительнее для использования на транспорте по целому ряду причин. Основная из них: при механическом опирании не нужно подводить к транспортному средству энергию для его позиционирования относительно путевой структуры. Такое решение не является энергозатратным, в то время как воздушное судно и поезд на электродинамической подушке требуют постоянной работы двигателя, поскольку в противном случае произойдёт катастрофическое падение транспортного средства.

В качестве движителя может быть использовано колесо – пневматическое, полимерное, алюминиевое или стальное. Чем мягче обод колеса (чем меньше его модуль упругости), тем большее сопротивление качению оно оказывает, причём с ростом скорости это сопротивление повышается

экспоненциально по причине увеличивающейся интенсивности смятия материала обода колеса и его нагрева. Например, с ускорением движения сопротивление пневматической шины возрастает со значений коэффициента сопротивления качению $f_к$ = 0,01 при малых скоростях до значений $f_к$ > 0,1 (т. е. на порядок и более) при скоростях, превышающих 250 км/ч.

Стальное колесо имеет коэффициент сопротивления качению $f_к$ = 0,001 и ниже, так как у стали наибольший модуль упругости – 200 000 МПа. Следовательно, оно наиболее энергоэффективно. Вместе с тем железнодорожная колёсная пара неоптимальна с позиций энергоэффективности из-за конической поверхности опирания на цилиндрическую головку рельса и наличия противосходного гребня. Это вызывает повышенные шумы, вибрации и износы как колеса, так и рельса, на что расходуется дополнительная энергия. Оптимальной является пара качения «цилиндрическое колесо – плоская головка рельса», что снижает потери энергии, т. е. повышает энергоэффективность колеса примерно в два раза по сравнению с конической железнодорожной колёсной парой.

На малых скоростях аэродинамика подвижного состава мало влияет на энергоэффективность транспорта. Например, для условного транспортного средства типа трамвая при скорости движения 50 км/ч мощность сопротивления качению стального колеса может составлять 10 кВт, а мощность аэродинамического сопротивления – 5 кВт. Однако если данный трамвай разогнать до 500 км/ч, т. е. увеличить скорость в 10 раз, то распределение требуемых мощностей изменится кардинально: на преодоление сопротивления качению колёс понадобится мощность в 10 раз большая (100 кВт), а на аэродинамику – в 1000 раз большая (5000 кВт), так как мощность аэродинамического сопротивления находится в кубической зависимости от скорости.

Поскольку при высокоскоростном движении (250 км/ч и более) основным потребителем энергии станет аэродинамическое сопротивление, именно его необходимо снижать в первую очередь. Воздушная или магнитная подушка не улучшит аэродинамику транспортного средства, а, наоборот, ухудшит, и не только из-за менее совершенных аэродинамических форм. Например, самолёту нужны крылья, рули, шасси, а поезду на магнитной подушке – системы вертикальной и горизонтальной стабилизации и иные выступающие элементы, приводящие к дополнительному сопротивлению, срыву воздушных потоков и существенно увеличивающие мидель – максимальную площадь поперечного сечения транспортного средства.

Кроме того, близость воздушного экрана – сплошного дорожного полотна, поверхности земли или воды – приводит к появлению паразитного экранного эффекта и усилению мощности аэродинамического сопротивления в два раза и более. При удалении от экрана на величину, превышающую поперечные размеры транспортного средства, экранный эффект снижается до нуля. Значит, если бы описанный выше условный трамвай двигался над дорогой со скоростью 500 км/ч на высоте более 3 м, то мощность его привода составляла бы не 100 кВт + 2500 кВт = 2600 кВт, а 100 кВт + + 2500/2 кВт = 1350 кВт. Очевидно, что никакая магнитная подушка, установленная на подобный трамвай, не дала бы такую экономию мощности. Скорее всего, из-за ухудшения аэродинамики, а также по причине потерь в линейном электродвигателе и самом электродинамическом подвесе мощность увеличилась бы до 3000 кВт и более. При этом стоимость данного условного трамвая и путевой структуры со статором линейного электродвигателя и системами для магнитного подвешивания возросла бы в разы, если не на порядок.

Таким образом, путевая структура должна представлять собой не сплошное дорожное полотно, а узкие рельсы, на которые опираются колёса транспортного средства. Рельс в виде балки (например, как в традиционной монорельсовой системе) очень массивный, с большими поперечными размерами. В связи с этим оптимальная путевая структура – не балка, работающая на изгиб, а жёсткая нить – предварительно напряжённый (растянутый) струнный рельс, имеющий жёсткость на пролёте благодаря усилиям растяжения (как у канатной дороги) и своей изгибной жёсткости (как у балки). Такой струнный рельс непрерывен по длине и не требует поперечных температурных швов, одного из недостатков традиционных балочных пролётных строений.

Значит, исходя из законов физики, оптимальная транспортная система (в первую очередь высокоскоростная) должна отвечать следующим требованиям:

- привод – электрический;
- движитель – колесо;
- материал в зоне контакта колеса и рельса – сталь;
- форма опорной части колеса – цилиндр;
- форма опорной части головки рельса – плоскость;
- аэродинамическое совершенство корпуса транспортного средства, минимизация его миделя и полное отсутствие на корпусе выступающих элементов: крыльев, рулей, шасси, стеклоочистителей, дверных ручек и др.;

• отсутствие сплошного дорожного полотна;

• подъём траектории движения подвижного состава над поверхностью земли (воды) минимум на 3 м;

• выполнение путевой структуры в виде предварительно напряжённого (растянутого) струнного рельса.

Чистые наземные транспортные системы будущего

В настоящее время наиболее приемлемой энергией для работы чистых наземных транспортных средств, систем и комплексов выступает электричество. Благодаря высокому КПД в мотор-колесе (по сравнению с ДВС), простоте устройства и отсутствию выбросов при эксплуатации электромобиль является тем чистым транспортным средством, которое, что очевидно, станет применяться в ближайшем будущем.

Основная задача, стоящая перед конструкторами такого транспорта, – снижение энергопотребления транспортных средств, систем и комплексов в несколько раз, т. е. до уровня, когда их энергообеспечение возможно осуществить при сокращении мирового энергопотребления в разы (а не на проценты), и не важно, какой энергии – электрической или бензина, угля, природного газа, атома. Это означает, что вектор развития наземного общественного и грузового транспорта в сторону энергозатратных и сложных высокоскоростных железных дорог и поездов на магнитной подушке уже не отвечает требованиям, предъявляемым к чистому транспорту будущего.

Ключевое направление снижения энергопотребления, а соответственно, и увеличения эффективности транспорта – уменьшение сопротивления движению. Главным фактором, препятствующим движению наземных транспортных средств на скорости до 100 км/ч, выступает трение. Наименьшее же сопротивление движению (наименьшее трение качения), как отмечено выше, оказывается у транспортного средства на стальных колёсах, движущегося по стальным рельсам.

Таким образом, массовый наземный транспорт (по крайней мере, грузовой и общественный пассажирский) для того, чтобы соответствовать требованиям к транспорту будущего, должен быть электрическим и обязательно рельсовым. То есть движение электромобилей на пневматических шинах в тоннелях, что сейчас предлагает, например, Илон Маск, является откатом назад даже по сравнению с обычным подземным рельсовым метро, которому исполнилось 160 лет. Более того, используемая на железных дорогах колёсная пара, введённая Джорджем Стефенсоном, с коническими колёсами, опирающимися на цилиндрическую головку рельса, имеет серьёзные недостатки: повышенные контактные напряжения в паре «колесо – рельс», износы, шумы и вызванные этим малые сроки службы. Перечисленных недостатков лишена пара «цилиндрический стальной обод колеса – плоская стальная головка рельса».

При скоростях движения от 250 км/ч, как отмечено выше, доминирующим сопротивлением становится аэродинамическое, обусловленное аэродинамичностью корпуса транспортного средства и экранным эффектом – близким расположением дорожного полотна (дорожная одежда, рельсошпальная решётка, поверхность земли или воды) к днищу корпуса. Только это увеличивает сопротивление и, соответственно, расход энергии на движение более чем в два раза. В результате высокоскоростные железные дороги и поезда на магнитной подушке с данных позиций бесперспективны – они потребляют слишком много энергии: удельная мощность их двигателей превышает 50 кВт на одного пассажира, что значительно хуже, чем даже у легкового автомобиля.

Говоря о безопасности транспортных систем будущего, надо учитывать, что основной причиной, вызывающей аварийную ситуацию, является человеческий фактор. Согласно данным корпорации Volvo Cars именно он становится виновником более чем 94 % аварий на автомобильном транспорте [10]. Следовательно, исключение человеческого фактора из управления транспортным комплексом и внедрение многоуровневой автоматизированной системы управления (АСУ) сможет на порядок уменьшить количество дорожно-транспортных происшествий и в итоге сохранить миллионы человеческих жизней.

Растущая перегруженность существующей автодорожной сети, интенсивность движения и разнообразие его участников делают практически невозможным использование автоматического пилотирования в автомобильном транспорте как самом массовом на планете, по крайней мере в ближайшие несколько десятков лет. Это в меньшей степени обусловлено видом энергии, обеспечивающей движение транспортного средства, а в большей – количеством машин на дорогах и неопределённостью алгоритма действий, когда на пути движения автомобиля могут оказаться пешеходы, дети, животные и другие внезапные препятствия: природные (снежный сугроб, гололёд или упавшее дерево) или техногенные (открытый канализационный люк или провал в дорожном полотне), а также отсутствием чётко выделенной (с точностью до миллиметров) путевой структуры у дороги и противосходной системы у традиционного автомобиля (в любой момент он может оказаться в кювете или выехать на встречную полосу).

Нередки случаи, когда участники дорожного движения предпринимают действия, которые невозможно предусмотреть компьютерной программой, – резкое торможение впереди идущего автомобиля, выезд на встречную полосу и др. Сюда же можно отнести ошибки и сбои в работе автоматики, которая должна одномоментно анализировать большое количество быстро меняющихся входных параметров в системе управления каждым автомобилем, включённым в «рой» не связанных в общую систему управления сотен, а то и тысяч других участников движения на дороге: автобусов, трамваев, мотоциклов, велосипедов, пешеходов и др. Вместе с тем нужен непрерывный мониторинг неустойчивых внешних природно-климатических и техногенных независимых факторов, представляющих опасность для движения.

Более того, юридическая неопределённость, которая возникает при отказах и сбоях АСУ, приводящих к авариям и катастрофам, необходимость установления степени ответственности и порядка компенсаций пострадавшим также не способствуют скорому переводу автомобильного транспорта на беспилотный режим.

Таким образом, при нынешних тенденциях развития наземного транспорта, независимо от того, будут это электромобили, электровелосипеды или электросамокаты, человеческий фактор – основная причина критически высокого уровня транспортных аварий и катастроф, гибели и увечий миллионов людей. Замена ДВС на электродвигатели в принципе не может решить эту проблему.

Единственным реальным способом внедрения беспилотных (автономных) систем является перевод транспорта на второй уровень над поверхностью земли или в тоннели, где путевые структуры, защищённые от внешних воздействий и оснащённые противосходной системой, выделены исключительно для движения определённого типа подвижного состава. При этом все транспортные средства и элементы каждого транспортно-инфраструктурного комплекса должны быть связаны между собой единой АСУ и общей быстродействующей системой обмена данными.

Целесообразен подъём путевой структуры над поверхностью земли, так как наличие практически неограниченного воздушного пространства позволяет организовать движение на высоте до 100 м и более, легко разводить пересекающиеся пути по высотам, а встречные маршруты – по разным направлениям. Тем самым исключается вероятность бокового или лобового столкновения. В то же время строительство подземных коммуникаций и разноуровневых тоннелей чрезвычайно затратно экономически, требует выемки большого объёма грунта, в том числе скального, надёжной гидроизоляции от подземных вод, что осложнено рядом других геологических и экологических факторов.

Таким образом, безопасность нового чистого наземного транспорта обеспечивается исключением человеческого фактора из управления, т. е. автономностью транспортных средств, наличием выделенных путевых структур, снабжённых противосходной системой, и переносом траекторий движения с поверхности земли на высоту около 10 м.

Одним из важнейших требований к общественному наземному транспорту является его коммерческая эффективность, которая может быть достигнута повышением производительности (увеличение количества перевезённых пассажиров и грузов за единицу времени), снижением капитальных и операционных затрат, удлинением жизненного цикла как транспортных средств, так и путевых структур и логистических комплексов в целом. При этом скоростное, безостановочное и безопасное движение транспортных средств возможно только при условии наличия специально выделенных путей, не пересекающихся с имеющимися маршрутами иных путевых структур и движением других машин, а также пешеходов и животных.

Система общественного транспорта должна эффективно и комфортно осуществлять перевозку как минимум 2000 пассажиров в час пик, что требует скорости движения транспортных средств около 100 км/ч и наличия соответствующего машинного и станционного оборудования. Многие известные транспортные решения (например, канатные дороги) не соответствуют указанным условиям и не могут рассматриваться в качестве массового общественного транспорта, который обеспечит мобильность земного населения.

Из всего перечисленного следует, что чистый транспорт будущего – это комплекс, гарантирующий эффективное и надёжное перемещение пассажиров при минимальном расходе энергии, сокращении вредных выбросов и воздействий на окружающую среду при производстве, эксплуатации и утилизации, отвечающий повышенным требованиям к безопасности всех транспортных операций и включающий в себя:

- рельсовые беспилотные электрические машины на стальных колёсах, имеющие выделенные траектории движения, оснащённые противосходной системой и единой системой автоматического управления и обмена дорожными данными;
- рельсовые пути, расположенные на опорах высоко над поверхностью земли, без возведения сплошного

дорожного полотна, с точечным опиранием на землю, что исключительно важно для высокоскоростного движения без образования паразитного экранного эффекта;

• систему электропитания – бортовую и/или внешнюю (контактная сеть);

• сопутствующую логистическую инфраструктуру на втором уровне – пассажирские станции, грузовые терминалы, депо, парковки, стрелочные переводы, линейные элементы систем электропитания, связи и автоматизированного управления, иное.

Однако, как указывалось выше, задача, решаемая при определении транспорта будущего, особенно в плане вероятного влияния нашей цивилизации на климат планеты, не может сводиться исключительно к разработке технического облика чистого транспорта. Решения должны быть такими, чтобы они могли применяться не только в странах с высокими доходами и уровнем жизни, но и по всей планете, поскольку глобальное воздействие, связанное с техногенными факторами, нельзя разделить политическими и географическими границами.

В Дубае, известном своими инновациями, стоимость одного километра действительно передового во всех отношениях надземного метро оказалась, даже по официальным данным, выше 100 млн USD/км (в ценах 2009 г.), а стоимость наземного трамвая – выше 85 млн USD/км (в ценах 2014 г.) [11, 12]. В развивающихся странах Азии, Африки и Латинской Америки невозможно представить расходование таких огромных средств для решения локальных транспортных проблем и создания городских транспортно-инфраструктурных комплексов.

Следовательно, стоимость путевой эстакады чистого транспорта будущего, в первую очередь общественного (как наиболее актуального для государств, где абсолютное большинство населения не имеет собственного автомобиля), должна равняться стоимости асфальтовой дороги такой же пропускной способности, а значит, не превышать 4–5 млн USD/км, включая развязки для пересечения рек, препятствий, существующих дорог и других инфраструктурных сооружений. Данная стоимость никогда не может быть достигнута для рельсового транспорта в случае применения массивной балочной эстакады (мост, путепровод, виадук) вследствие её высокой материалоёмкости и сложной технологии строительно-монтажных работ с использованием тяжёлой грузоподъёмной техники.

Таким образом, к техническому определению чистого транспорта (в его глобальном понимании и в соответствии с возможностью реально повлиять на климатические и иные изменения, связанные с техногенной деятельностью человека) необходимо добавить социально-экономические аспекты, в первую очередь возможность адаптации транспортной технологии к внедрению на всей планете, особенно в странах с быстрорастущим количеством населения и развивающимися экономиками.

Рассмотренными технико-экономическими показателями обладает Струнный транспорт Юницкого (uST), хотя, конечно же, каждая из известных транспортных технологий может применяться в отдельных случаях, не являясь при этом универсальным чистым транспортом будущего, требованиям которого соответствует только uST.

Описание uST

Транспортно-инфраструктурные решения будущего должны иметь низкую материалоёмкость и стоимость (на уровне канатных дорог), быть достаточно доступными при строительстве и эксплуатации и универсальными для климатических и географических условий в месте применения. Транспортные коммуникации должны быть устойчивыми (нечувствительными) к экстремальным природно-климатическим и техногенным воздействиям: ураганному ветру (скорость до 250 км/ч и более), интенсивным дождям и снегопадам, наводнениям (подъём уровня воды до 10 м и более), снежным и песчаным заносам (высота до 5 м и более), туманам и пылевым бурям, землетрясениям (до 9 баллов по шкале Рихтера), цунами (высота до 10 м и более), жаре (до 60 °C на солнце), холоду (до –60 °C), вандализму и террористическим актам.

Всем вышеперечисленным требованиям отвечает uST, основанный на использовании предварительно напряжённой рельсо-струнной транспортной эстакады. Он может применяться для пассажирских и грузовых перевозок: при скорости транспортных средств до 150 км/ч – в городе; до 500 км/ч (в перспективе – до 600 км/ч, а при устройстве рельсо-струнной путевой структуры в форвакуумном тоннеле – до 1500 км/ч) – в междугородном сообщении.

Рельсо-струнная путевая структура, включающая преднапряжённые струны (выполнены из стали, базальтовых волокон, углепластика и иных высокопрочных материалов), долговечна, надёжна, имеет противосходную систему, не обладает паразитным экранным эффектом и в несколько раз дешевле любого другого транспортного решения в эстакадном исполнении за счёт низкой материалоёмкости и минимального землеотвода и объёма земляных работ. При этом городской комплекс струнного транспорта может осуществлять перевозку до 50 000 пасс/ч, высокоскоростной – до 100 млн пасс/год, грузовой – до 100 млн т/год [2].

Транспортные средства – беспилотные рельсовые электромобили на стальных колёсах, получившие название «юнимобиль»; вместимость – до 50 пассажиров и более (при формировании из юнимобилей многовагонных пассажирских поездов), грузоподъёмность – до 50 тонн и более (при формировании грузовых поездов). Использование стальных колёс и стальных рельсов (как на железных дорогах) повышает энергоэффективность подвижного состава по сравнению с поездами на магнитной подушке, в том числе благодаря исключению крайне неэффективного линейного электродвигателя, КПД которого ниже 50 %, в то время как КПД электрического мотор-колеса uST достигает 90 % и более.

Кроме того, колёсный электромобиль (особенно монорельсовый, с одним рядом колёс, установленным по центру машины) можно выполнить высокоаэродинамичным, без паразитного экранного эффекта, создаваемого ездовым полотном (рельсошпальной решёткой) в поездах на магнитной подушке. Поэтому при коэффициенте сопротивления качению $f_к$ цилиндрического (а не конического) стального колеса по плоской (а не цилиндрической) стальной головке рельса, равном 0,001 и менее, сопротивление движению рельсового электромобиля будет значительно ниже, чем сопротивление движению электромобиля, имей он магнитную подушку и линейный электродвигатель (вместо колёсного движителя), что к тому же на порядок дороже.

Транспорт uST может быть монорельсовым, бирельсовым и квадрорельсовым, навесным и подвесным. Путевая структура в зависимости от поставленных задач (скорость движения и масса юнимобилей, длина пролётов, объём перевозок и др.) – гибкой, полугибкой, полужёсткой либо жёсткой. При этом гибкая путевая структура со струнами из высокопрочной стальной проволоки может в условиях земной гравитации проходить пролётами длиной до 3000 м, а при выполнении струн из более прочных и лёгких материалов, к примеру углепластика, – до 5000 м.

Значит, мнение ряда экспертов, пророчащих будущее транспорту, где оптимизирован лишь один параметр, например снижение механического сопротивления движению (как у поезда на магнитной подушке Transrapid) или уменьшение аэродинамического сопротивления (как в вакуумной или форвакуумной трубе у Hyperloop), ошибочно: преимущество у uST на стальных колёсах, оптимизированного не по одному, а по десятку критериев одновременно. Об этом говорят законы физики, справедливые не только сегодня, но и в перспективе, а uST создан исходя из физических законов – гравитации и сохранения, механики и электромеханики, прочности материалов и устойчивости конструкций, аэродинамики и электродинамики и др. Следовательно, даже в отдалённом будущем ни мифические летающие тарелки, ни гравилёты, ни порталы, открывающиеся в иные пространства, не смогут быть эффективнее uST на планете Земля, но однозначно окажутся намного дороже и экологически опаснее, т. е. экономически и социально невостребованными.

Каждый адресный проект uST представляет собой транспортно-инфраструктурный комплекс, включающий пассажирские станции и грузовые терминалы, опоры (анкерные и промежуточные), предварительно напряжённые (растянутые) рельсы нескольких типов конструкций для движения рельсовых электромобилей, оснащённых противосходной системой. Согласованность движения юнимобилей обеспечивает АСУ, которая может находиться в различных местах транспортного комплекса (например, на одной из станций или анкерных опор, как показано на рисунке 1).

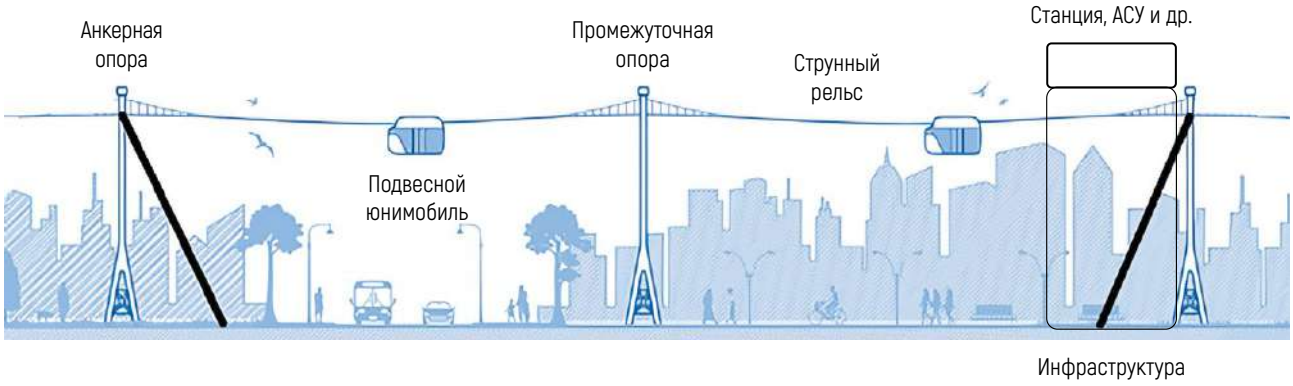


Рисунок 1 – Рельсо-струнный комплекс uST подвесного типа
с полугибкой (центральные пролёты) и гибкой (боковые пролёты) путевой структурой

Преимущества uST

Основными преимуществами uST являются:

- высокая скорость движения;
- энергоэффективность благодаря стальным колёсам, высокой аэродинамичности рельсового электромобиля и отсутствию экранного эффекта;
- максимальная безопасность благодаря стальным рельсам и колёсам, противосходной системе, продублированной на каждом колесе, нахождению подвижного состава на втором уровне – высоко над землёй;
- минимальное изъятие земли под транспортно-инфраструктурный комплекс благодаря отсутствию земляной насыпи, увеличению длины пролётов, точечному опиранию транспортной эстакады на поверхность земли;
- низкая ресурсоёмкость (включая земляные работы и землеотвод) и небольшая стоимость транспортной эстакады благодаря предварительному напряжению (натяжению) рельсо-струнной путевой структуры и второму уровню её размещения, а также отсутствию ресурсоёмких многоуровневых развязок, путепроводов и водопропускных сооружений;
- нечувствительность к рельефу местности и экстремальным природно-климатическим условиям (низкие и высокие температуры, обильные снегопады и проливные дожди, слабые и вечномёрзлые грунты, сейсмика, штормовой ветер, наводнения, цунами и др.);
- отсутствие пересечений с коммуникациями и транспортными потоками на первом уровне;
- экологичность благодаря использованию электрической тяги и стальных колёс, а также низкому удельному потреблению энергии при движении, особенно при высокоскоростном;
- дружественность природе – рельсо-струнная эстакада не препятствует миграции диких и домашних животных, перемещению сельскохозяйственной и специальной техники, движению поверхностных и грунтовых вод (например, традиционная земляная насыпь автомобильных и железных дорог, послойно уплотнённая, является низконапорной плотиной. Перерезая истоки рек, она приводит к заболачиванию обширных территорий с одной стороны насыпи и опустыниванию – с другой).

Применение сил гравитации для движения юнимобилей

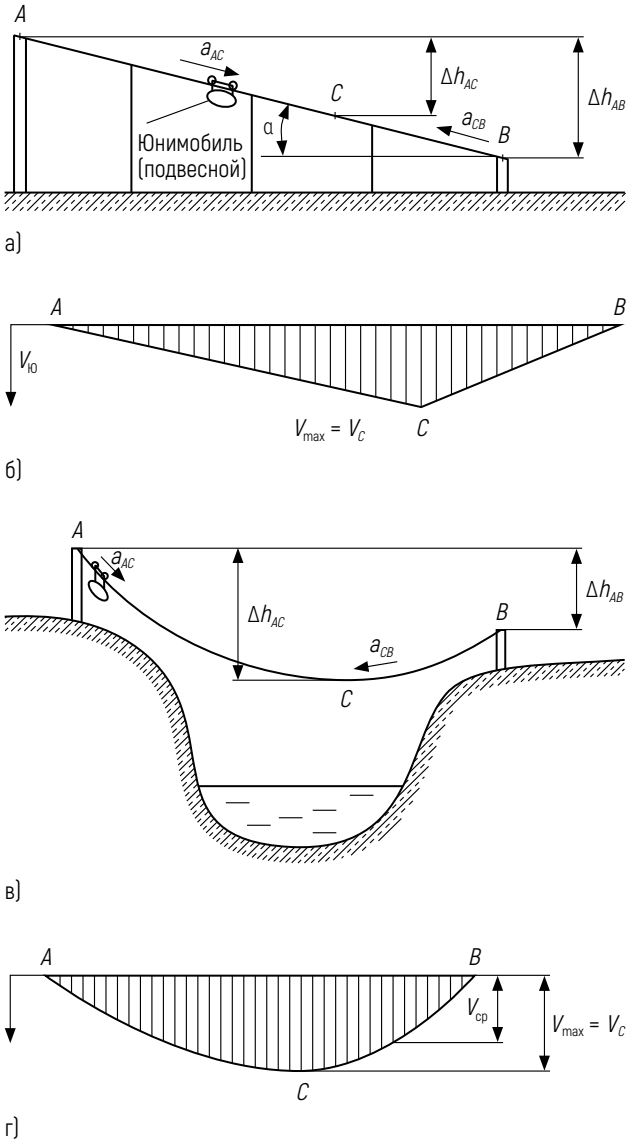
Энергоэффективность любого вида транспорта зависит от режимов движения транспортных средств. В колёсном транспорте (автомобиль, в том числе электромобиль, трамвай, троллейбус, монорельс, легкорельсовый транспорт, канатная дорога с движением колеса по канату и др.) на длинных дистанциях затраты энергии обусловлены потерями на преодоление сопротивления качению колёс, а также на аэродинамику.

В городском транспорте энергоэффективность логистики резко ухудшается из-за необходимости остановок через каждые 400–600 м и даже чаще – на перекрёстках, пешеходных переходах, светофорах и в пробках. Это требует, причём каждые несколько минут (и даже менее), снова разгонять, а затем тормозить транспортное средство.

При разгоне расходуется значительное количество энергии, а при торможении она выбрасывается в окружающую среду в виде тепла и продуктов износа тормозной системы, колёс и дорожного полотна (рельсов). Эти паразитные потери энергии происходят независимо от загруженности подвижного состава ввиду его высокой удельной материалоёмкости (в пересчёте массы транспортного средства на одного пассажира или тонну груза). Городские жители часто становятся свидетелями того, как между часами пик трамвай массой 20 тонн везёт двух-трёх пассажиров общей массой около 200 кг, т. е. транспортирует не груз, а сам себя.

Таким образом, в городском транспорте энергоэффективность определяется максимальной скоростью движения, массогабаритными характеристиками подвижного состава и расстоянием между остановками. Это относится и к uST, однако энергоэффективность городского юнимобиля можно повысить при использовании сил гравитации для его разгона на специально организованных спусках и торможения при подъёмах. Гравитационные двигатель и тормоз, а также гравитационный рекуператор преобразования потенциальной энергии в кинетическую и обратно, причём с КПД 100 % (т. е. без потерь энергии), легко реализуемы в эстакадном транспорте за счёт перепада высот между смежными станциями.

На рисунке 2 показана схема движения подвесного юнимобиля на наклонном прямолинейном участке между верхней станцией *A* (начало пути) и нижней станцией *B* (конец пути). На участке *AC* гравитация разгоняет юнимобиль до скорости V_{max}, а на участке *CB* транспортное средство необходимо тормозить для въезда с нулевой скоростью на нижнюю станцию *B*. Для возвращения на станцию *A* по линии, имеющей обратный уклон, юнимобиль следует поднять на станции *B* на высоту Δh_{AB}.



C – точка начала торможения юнимобиля
a_{AC} – ускорение разгона на участке *AC*
a_{CB} – ускорение торможения на участке *CB*
$V_Ю$ – скорость движения юнимобиля
$V_{ср}$ – средняя скорость движения
V_{max} – максимальная скорость движения
V_C – скорость движения в точке *C*

Рисунок 2 – Схема движения юнимобиля на наклонном участке пути между точками *A* (начало пути) и *B* (конец пути):
а – прямолинейный путь;
б – эпюра скорости движения на прямолинейном участке пути;
в – путь с параболическим провисом;
г – эпюра скорости движения на параболическом участке пути

Следовательно, в такой схеме движения потенциальная энергия подводится к юнимобилю за счёт его подъёма на высоту h: $E_п = mgh$. При этом энергоэффективность движения существенно не улучшается из-за необходимости подъёма юнимобиля на каждой станции, например с помощью вертикального стрелочного перевода (грузового лифта), на достаточно большую высоту Δh_{AB}. Однако это позволяет выполнить юнимобиль неприводным (более простым, лёгким и дешёвым), какими являются вагоны в железнодорожном поезде (впрочем, на железной дороге в логистике также используется гравитация, например на сортировочных горках для ускорения расформирования составов из грузовых вагонов).

Ускорение разгона a_{AC} зависит от угла наклона пути в точке нахождения юнимобиля. Так, на прямолинейном участке *AC* (рисунок 2а), если не учитывать аэродинамические потери, оно выражается зависимостью:

$$a_{AC} = g(\sin\alpha - f_к \cos\alpha), \qquad (1)$$

где g – ускорение свободного падения на поверхности Земли, м/с^2;

$f_к$ – коэффициент трения качения колеса по рельсу;

α – угол наклона путевой структуры на участке *AC*, °.

Согласно формуле (1), для того чтобы обеспечить, например, ускорение 0,2 м/с^2 (при $f_к$ = 0,001), угол наклона прямолинейного участка путевой структуры должен составить на Земле 1,21°. Если между станциями *A* и *B* расстояние по горизонтали 1000 м, то требуемый перепад высот равен tg 1,21° × 1000 м = 21,1 м. При данном ускорении юнимобиль за 90 с разовьёт скорость 18 м/с (64,8 км/ч) и проедет 810 м. При этом средняя скорость движения будет в два раза ниже: $V_{ср}$ = 32,4 км/ч. Весь путь в 1000 м юнимобиль, двигаясь со средней скоростью 36 км/ч, преодолеет примерно за 100 с.

Если принять условие, что половину пути юнимобиль будет разгоняться, а половину – замедляться (с одинаковым ускорением), то он, двигаясь со средней скоростью около 26 км/ч, проедет 500 м за 70,7 с. Однако с учётом потерь энергии на аэродинамику средняя скорость движения будет ещё ниже.

В случае не прямолинейного движения, а движения по провисающей направляющей (при выполнении всего участка пути однопролётным) с большим провисом, например при прохождении через реку или ущелье (рисунок 2в) или по крышам высотных зданий, движение юнимобиля на перегоне становится более энергоэффективным и скоростным (по причине более высоких углов наклона в начале и конце пути). Максимальная скорость движения в нижней точке *C* определяется величиной потенциальной

энергии юнимобиля, запасённой на станции *A*, и равна $V_{max} = \sqrt{2gh}$ (без учёта сопротивления внешних сил движению). Необходимый перепад высот для компенсации потерь энергии выражается зависимостью:

$$\Delta h_{AB} = \frac{\Delta E}{mg}, \qquad (2)$$

где m – масса юнимобиля, кг.

Например, при провисе пути (перепад высот между точками *A* и *C*) Δh_{AC} = 21,1 м максимальная скорость юнимобиля (при отсутствии потерь энергии) составит V_{max} = 20,3 м/с (73,2 км/ч), а средняя общая скорость $V_{ср}$ – около 57 км/ч. При этом юнимобилю для движения с такой скоростью не нужен ни двигатель, ни тормоз, так как на участке *CB* тормозить будет гравитация. Если перепад высот Δh_{AB} между станциями *A* и *B* окажется достаточным для компенсации потерь энергии ΔE (в колесе и аэродинамике), то юнимобиль прибудет на станцию *B* с нулевой скоростью без потерь энергии на разгон и торможение. Если при $V_{ср}$ = 58 км/ч на участке l = 1000 м принять следующие условия движения юнимобиля: коэффициент трения качения $f_к$ = 0,001, коэффициент аэродинамического сопротивления юнимобиля C_x= 0,06, масса юнимобиля m = 2000 кг, площадь сопротивления воздушному потоку (мидель) S = 2 м^2, то суммарная работа сил сопротивления составит примерно 35 кДж.

Согласно формуле (2) для компенсации указанных выше потерь достаточно перепада высот Δh_{AB} = 1,8 м. При этом юнимобиль преодолеет данное расстояние между станциями за 63 с. При увеличении провиса Δh_{AC} скорость движения также возрастёт, а время в пути уменьшится при прочих равных условиях.

Следует отметить, что в точке *B* (рисунок 2) скорость юнимобиля V_B зависит от его аэродинамических характеристик и массы и в реальных условиях не всегда может равняться нулю (в примере рассмотрен только один из вариантов). Важно соблюсти главное требование: V_B должна быть выше нуля (для возможности заезда по инерции на станцию *B*).

Таким образом, на перегоне длиной 1000 м на провисающем пути uST энергетика средних скоростей движения будет в 4,8 раза выше, чем на прямолинейном наклонном пути: (57 км/ч)^2 / (26 км/ч)^2 = 4,8 (скорость взята в квадрат, так как кинетическая энергия движения пропорциональна квадрату скорости). При этом затраты энергии на подъём юнимобиля на высоту уменьшатся в 12 раз: 21,1 м / 1,8 м = 12. Как результат, при приведённых выше характеристиках комплекса uST городская трасса с провисающей путевой структурой (по сравнению с наклонной прямолинейной структурой, показанной на рисунке 2а) будет условно (при равенстве критериев оценки) энергоэффективнее в 57 раз: 4,8 × 12 = 57.

Поскольку uST энергоэффективнее традиционного городского транспорта (автобус, троллейбус, электромобиль на пневмошинах, трамвай, метро, монорельс, легкорельсовый транспорт и др.) в 3–5 раз, то комплексный показатель энергоэффективности городского транспорта можно снизить на два порядка, т. е. более чем в 100 раз (!), если городскую логистику реализовать с помощью большепролётного подвесного uST провисающего типа, приведённого на рисунке 2в.

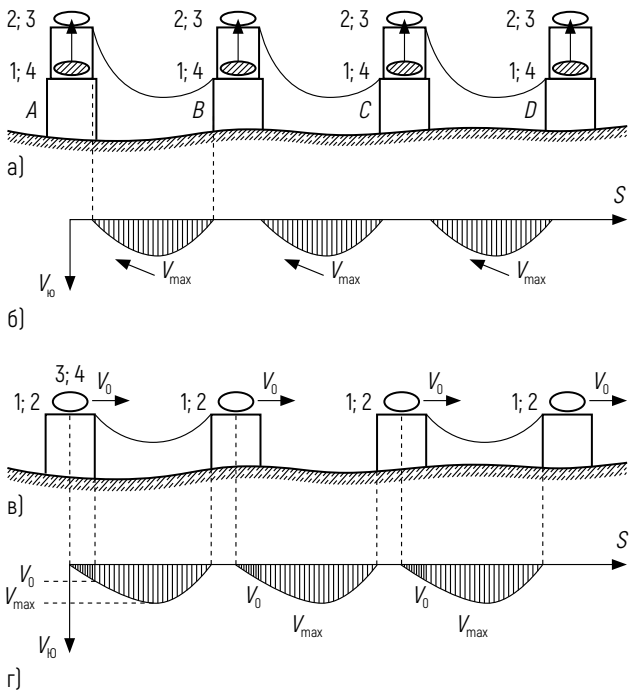
Кроме того, такой uST будет менее материалоёмким и существенно более дешёвым, чем при использовании прямолинейных пролётных строений (рисунок 2а), так как на каждом километре маршрута не нужны 10–20 промежуточных (поддерживающих) опор высотой более 10 м и общей стоимостью выше 1 млн USD. Следует также отметить простой конструктив и меньшую стоимость анкерных опор и провисающей (а не прямолинейной) рельсо-струнной путевой структуры.

На рисунке 3 показана схема городской трассы провисающего типа, проложенной по крышам высотных зданий, в двух вариантах исполнения:

- с подведением необходимой потенциальной энергии к юнимобилю на каждой станции (для движения на следующем перегоне) путём его подъёма на высоту 2–3 м, т. е. с уровня 1 на уровень 2 (рисунок 3а);
- с подведением стартовой кинетической энергии путём разгона юнимобиля на каждой станции внешним устройством до скорости V_0 = 6–7 м/с (рисунок 3в).

Трасса, изображённая на рисунке 3в, является более скоростной, так как все перегоны будут преодолены с большей средней скоростью V_{max} и за меньшее время при одинаковых начальных затратах энергии (потенциальной в первом случае и кинетической – во втором).

Кроме представленных на рисунках 2 и 3 схем движения неприводных юнимобилей, целесообразно использовать технологию движения при непрерывном подводе энергии на перегоне для компенсации механических и аэродинамических потерь энергии, поскольку юнимобили обязательно должны иметь маломощный аварийный привод для выезда из нижней точки *C* (рисунок 2) в случае непредвиденной аварийной остановки. Для этого достаточно электропривода мощностью до 1 кВт на каждое колесо, с питанием от бортового аккумулятора, т. е. не нужны многочисленные электроизоляторы, дорогостоящая контактная сеть, токоприёмники и другие элементы электрифицированных дорог. Более того, не потребуется поднимать юнимобиль на станциях с уровня 1 на уровень 2 или разгонять до стартовой скорости V_0, что упростит и удешевит инфраструктуру uST – анкерные опоры, пассажирские станции, депо, стрелочные переводы, АСУ и др.



1, 2 – уровни прибытия юнимобиля на станцию
и убытия со станции соответственно
3, 4 – юнимобиль на станции в положении убытия
и прибытия соответственно
S – расстояние вдоль пути
V_0 – начальная скорость движения
(скорость выезда юнимобиля со станции)
V_{max} – максимальная скорость движения
$V_ю$ – скорость движения юнимобиля

Рисунок 3 – Схема движения юнимобиля:
а – между разноуровневыми станциями,
размещёнными на крышах зданий *A*, *B*, *C* и *D*;
б – эпюры скоростей движения между разноуровневыми станциями;
в – между станциями, размещёнными на одном уровне (высоте);
г – эпюры скоростей движения между станциями
размещёнными на одном уровне (высоте)

Пассажирские станции и вокзалы uST провисающего типа, находящиеся на крышах городских зданий, не займут дорогостоящую городскую землю и будут значительно дешевле, чем при их устройстве на поверхности городских улиц, уже занятых асфальтом, газонами, парками, коммуникациями, инженерными сетями и иными элементами существующей инфраструктуры с потоками пешеходов, движением общественных и личных транспортных средств и другими обременениями.

Для более глубокого понимания преимуществ подвесного uST провисающего типа, например, перед традиционным поездом на магнитной подушке, за которым многие специалисты видят будущее транспортной отрасли, проведём мысленный эксперимент. Допустим, что между Москвой и Владивостоком построен линейный город кластерного типа длиной 9000 км (расстояние между кластерами – 1 км) и проложены две идеальные городские дороги: одна – горизонтальная без перепадов высот для поезда на магнитной подушке, вторая – uST провисающего типа (провис – 20 м на всех пролётах длиной по 1 км). В каждом случае обеспечены идеальная магнитная подушка (юнимобиль может иметь не только колёса, но и магнитную подушку) и идеальная аэродинамика рельсового электромобиля. Никаких потерь энергии. В Москве два проводника одномоментно толкнули со скоростью 1 мм/с (3,6 м/ч) совершенно одинаковые электромобили массой по 20 тонн и тут же сели в них.

Вопрос: за сколько времени они доедут до Владивостока? Ответ: вагон поезда на магнитной подушке, двигающийся со скоростью 3,6 м/ч, доберётся до Владивостока за 2 500 000 ч (104 000 суток, или 285 лет). Подвесной электромобиль uST, получивший точно такой же изначальный импульс, двигаясь со средней скоростью 56,8 км/ч (обоснование дано выше), доедет до Владивостока за 158 ч (6 суток 14 ч). При увеличении провиса путевой структуры на каждом пролёте подвесного uST среднюю скорость можно повысить, а время в пути сократить до 4–5 суток (при том что в зоне городских остановок, устроенных через 1 км (т. е. их будет 9000), юнимобиль движется со скоростью 3,6 м/ч). Хотя этот идеальный пример неосуществим в реальной логистике, тем не менее он показывает неоспоримые преимущества uST провисающего типа перед другими видами транспорта, имеющими горизонтально проложенную путевую структуру.

Оптимизация транспортно-логистической инфраструктуры проживания и расселения на Земле

Планировка современных городов и логистика в них, а также архитектура, здания и сооружения не отвечают условиям безопасного, устойчивого и комфортного проживания. Инфраструктура, особенно в мегаполисах, строится не для людей, а для машин, в первую очередь для автомобильного транспорта. Ежегодное производство легковых автомобилей уже превысило 60 млн, а их автопарк на планете несколько лет назад преодолел отметку в 1 млрд.

Пробки на дорогах, смог, шум от городского транспорта, грязный воздух, почва, пропитанная солями и канцерогенами от выхлопных газов, антиобледенительных реагентов, продуктов износа шин и асфальта. Улицы, дворы,

наземные, надземные и подземные гаражи, стоянки и парковки забиты миллионами автомобилей. Таковы реалии мегаполисов.

Города заняли огромные площади, причём на лучших землях. Эти территории выведены из биосферных жизненных циклов – «закатаны» в асфальт и «похоронены» под бетоном. Например, самый большой на планете китайский мегаполис Чунцин (82 400 км^2) по площади практически сравнялся с такой страной, как Австрия (83 800 км^2) [8].

До конца XXI в. на дорогах мира, в первую очередь в городах, могут погибнуть более 100 млн человек, а свыше миллиарда будут искалечены. Однако эти жизни можно сохранить, а земли вернуть истинному землепользователю – биосфере планеты, если изменить структуру расселения и проживания людей, сделать города пешеходными, а транспорт перенести на второй уровень – на высоту 10 м и более.

Линейный город. Альтернативой современным мегаполисам станут линейные города кластерного типа, гармонично вписанные в окружающую среду любой природно-климатической зоны на планете, – они не только не отнимут под застройку плодородную землю, но и дополнительно создадут её, причём по качеству превосходящую тучный чернозём [3, 13, 14]. Каждый кластер городского поселения сельского типа будет обеспечен всем необходимым собственного производства – чистой электрической и тепловой энергией, органической пищей, артезианской (родниковой) водой. Благодаря таким городам с планеты исчезнут пустыни, а Земля в XXI в. преобразится в цветущий сад, где безопасно и комфортно сможет жить и трудиться всё будущее человечество – 10 млрд человек.

Линейный город uCity будет выполнен в виде пешеходных кластеров, вытянутых в линию и соединённых друг с другом городским электрическим горизонтальным лифтом на втором уровне – трассой uST, наиболее безопасным, энергоэффективным и экологически чистым транспортом [1–3].

Через линейный город или параллельно ему пройдёт транспортно-коммуникационный коридор uNet – высокоскоростные воздушные трассы uST (скорость до 360 км/ч), гиперскоростные трассы uMach (скорость до 1500 км/ч), размещённые в форвакуумных тоннелях, и грузовые рельсострунные системы для осуществления кластерных, континентальных и межконтинентальных перевозок, в том числе через моря и океаны [8, 15, 16].

Общая длина сети uNet с учётом поперечных линий, заходящих в охраняемые природные территории и месторождения полезных ископаемых, достигнет в таком случае примерно 15 млн км.

Жилой кластер линейного города представлен доминантным сооружением (пересадочным узлом), в котором разместятся станции и вокзалы транспорта «второго уровня» и совмещённые с ними торговые центры, отели и другие социокультурные объекты. Вокруг, в пешей доступности на площади около 100–200 га, будут построены одноэтажные и малоэтажные жилые дома для 2000–5000 и более жителей, обеспеченных всем необходимым (пища, вода, энергия, доступ к полному набору услуг), а также работой и отдыхом. Подобная целостность даст возможность поселению самодостаточно функционировать даже в условиях пандемий, временной изоляции, военных действий или стихийных бедствий.

Жилые дома-квартиры планируется сблокировать в единые функциональные комплексы в логике многоквартирного «горизонтального небоскрёба», имеющего длину до 400–500 м и более. Крыши домов будут выполнены в виде застеклённых теплиц или оранжерей; по торцам здания оборудованы технические помещения, установлены грузовые лифты.

Индустриальные кластеры линейного города расположатся в стороне от жилых. Сообщение внутри данных комплексов предполагается пешим или велосипедным – такое поселение можно пересечь за 15–20 мин.

При средней плотности расселения, равной, например, 2500 чел/км, для проживания 10 млрд человек общая длина линейных городов, построенных вдоль коммуникационной сети uNet, совмещённой с реликтовыми солнечными биоэлектростанциями, линиями электропередач и связи, составит 4 млн км. Тогда сеть линейных городов займёт площадь около 4 млн км^2, или 1/37 земной суши, а 36/37 могут быть отданы национальным паркам, заповедникам, заказникам и природным резервациям, т. е. останутся, как и сложилось исторически, у биосферы – истинного землепользователя на нашей планете.

Кстати, площадь пустынь на Земле (21 млн км^2 без учёта полярных пустынь Антарктиды и Арктики) в пять раз больше [17]. Если озеленить их и только там построить пешеходные линейные города, то на этой территории смогут проживать 50 млрд человек, обеспеченных всем необходимым: органической пищей, питьевой водой, энергией, жильём, транспортом, работой, отдыхом. Сделать это значительно проще и дешевле, чем, окончательно истощив, загадив и уничтожив наш общий дом – биосферу планеты, лететь на далёкий, холодный и враждебный Марс с билетом в один конец за миллионы долларов. И для чего? Чтобы влачить там жалкое существование в скафандрах, без местной органической пищи, свежей питьевой воды и живительного воздуха?

Более того, линейные города uCity займут сушу условно: на крышах всех зданий и сооружений (в теплицах и оранжереях) вырастут сады. Здесь будут воссозданы природные биогеоценозы и экосистемы биосферного типа, даже на месте нынешних пустынь и вечной мерзлоты.

При реализации в линейном городе uST провисающего типа, описанного выше (рисунок 3), средняя скорость движения городского транспорта составит 60–80 км/ч. Например, если расстояние между смежными станциями равно 1–1,5 км, а провис однопролётной путевой структуры – 30 м, то максимальная скорость подвесного юнимобиля в середине пролёта достигнет 87 км/ч только за счёт гравитационного двигателя. Не имеющий помех для движения – перекрёстков и пешеходных переходов, автомобилей, трамваев и автобусов, снежных или песчаных заносов, луж на проезжей части и др., – это будет самый безопасный и быстрый городской общественный транспорт в мире (средняя скорость в московском метро примерно в два раза ниже – 41 км/ч).

В путевую структуру uST будут «зашиты» электрические и информационные сети, обеспечивающие электроэнергией и связью кластеры и линейный город в целом со всей его инфраструктурой: социально-культурной, торгово-развлекательной, научно-промышленной, оздоровительно-рекреационной и иной.

Каждый кластер будет иметь размещённую вне жилой зоны реликтовую солнечную биоэлектростанцию (мощность 2–5 МВт в зависимости от количества жителей кластера и его назначения), которая способна производить в течение года до 20 000 тонн биогумуса uTerra (жидкого и рассыпчатого). Это позволит ежегодно превращать до 1 км^2 пустынь (соразмерно площади среднего жилого кластера) в высокоплодородную землю типа чернозёма. Таким образом, за 50 лет функционирования общепланетарный линейный город сможет повысить плодородие до уровня тучного чернозёма на всей земной суше, включая пустыни и горы.

Взлётно-посадочная эстакада общепланетарного транспортного средства и экваториальный линейный город. Города нового поколения – линейные города uCity – разрабатываются в рамках программы «ЭкоМир» [16]. Создание ЭкоМира, включающего БиоМир, ТехноМир и ХомоМир, является насущной задачей для получения приемлемых условий устойчивого роста и инженерного эволюционирования техногенной цивилизации в пределах своей колыбели – планеты Земля – и в космическом пространстве.

Развитие инженерных технологий непременно приведёт человечество к масштабному освоению ближнего и дальнего космоса. В программе «ЭкоМир» обосновано, что такая амбициозная цель будет достигнута только с помощью строительства и эксплуатации общепланетарного транспортного средства (ОТС) и космического индустриального ожерелья «Орбита» (КИО «Орбита»). Один из главных вопросов, который предстоит решить при возведении ОТС, – организация линейных поселений для ресурсного и кадрового обеспечения геокосмической логистики. Оптимальное место расположения ОТС – экваториальная зона планеты с дислокацией обслуживающих его систем в экваториальном линейном городе (ЭЛГ) [18].

ЭЛГ является частным случаем новой линейной урбанистической концепции программы «ЭкоМир» – линейного города uCity – и представляет собой застройку жилых, административных и индустриальных кластеров, где используются экоориентированные технологии проживания EcoHouse и ЭКД-Земля (ЭкоКосмоДом на планете Земля), совмещённые с другими биосферными технологиями:

- uEnergy – снабжение поселений «зелёной» электроэнергией и теплом;
- uGreen – обеспечение натуральными (органическими) продуктами питания;
- uNet – формирование транспортной, энергетической и информационной наземной коммуникационной сети с применением экоориентированных технологий uST.

ЭЛГ – земной компонент геокосмического транспортно-инфраструктурного комплекса, на территории которого находится взлётно-посадочная эстакада ОТС со всей инфраструктурой, необходимой для осуществления полётов и обслуживания глобальных геокосмических грузопассажирских потоков (миллионы пассажиров и миллионы тонн грузов ежегодно). ЭЛГ гармонично вписан в природную среду сухопутных и водных участков экваториальной зоны планеты и выполнен в логике пешеходных кластеров, соединённых между собой транспортными линиями uST.

Строительством ЭЛГ, протяжённость которого составит 40 076 км, решается задача жизнеобеспечения всех категорий работников, задействованных в обслуживании наземной части геокосмического комплекса ОТС, а также их семей, в общей сложности – около 1 млн человек.

Эстакада ОТС, вдоль которой разместятся жилые, научные, производственные и иные кластеры, является главной осью ЭЛГ. Использование наземных транспортно-инфраструктурных комплексов uST обеспечит требуемую транспортную доступность для функционирования геокосмической логистики индустриальных масштабов.

Основные элементы структуры ЭЛГ, расположенные на суше и на море:

- взлётно-посадочная эстакада ОТС с размещёнными в ней инженерными и коммуникационными сетями;
- геокосмические комплексы астронавигации и автоматизированного управления;
- научные, производственные и ремонтно-эксплуатационные кластеры по сборке, обслуживанию и ремонту узлов комплекса ОТС;
- энергетические кластеры, снабжающие геокосмический комплекс всеми видами энергии, а также электрической энергией для штатных режимов взлёта и посадки ОТС общей мощностью около 100 млн кВт;
- экваториальные участки глобальной сети uNet, а также сети регионального и внутригородского транспортного сообщения;
- логистические центры и хабы, пересадочные узлы и грузовые терминалы, пассажирские станции и вокзалы;
- жилые комплексы со всей сопутствующей инфраструктурой;
- кластеры с учебными, культурными, оздоровительными и спортивными учреждениями;
- кластеры по производству и переработке органической сельхозпродукции;
- охраняемые, сохраняемые и развиваемые природные комплексы.

Жилая застройка ЭЛГ формируется из самодостаточных гармонично спроектированных единиц, основной характеристикой которых является высокое качество жизненной среды. Воздух, вода, почва, а также флора и фауна здесь не подвергаются угнетающему или разрушающему техногенному воздействию. Для живой природы оставлена большая часть территории (свыше 90 %), в том числе на эксплуатируемых крышах зданий и сооружений.

Линейные города, и самый протяжённый из них – ЭЛГ, отличают отсутствие антропогенной угнетающей нагрузки на биосферу планеты, а также высокая эффективность хозяйствования, достойный уровень жизни и условий труда и отдыха для всех без исключения жителей. При застройке кластеров и линейных объектов ЭЛГ будут учтены национальные законодательства и требования, предъявляемые непосредственно к элементам возводимой инфраструктуры.

Планировочная организация жилых кластеров ЭЛГ формируется на основе комплексной застройки, в которую входят:

- жилые здания с объектами социальной инфраструктуры;
- пешеходные улицы и общественные центры;
- элементы природно-экологического каркаса (парки, скверы, бульвары и иные территории общего пользования).

Биотехнологии, разрабатываемые под руководством инженера Анатолия Юницкого, предусматривают безотходные процессы выращивания и потребления органических продуктов питания. По завершении сельскохозяйственного цикла вместо отходов получается биологический гумус uTerra (жидкий и рассыпчатый), который возвращается в почву в виде органических удобрений, как это и было в течение предшествующих миллионов лет, – в новый биологический цикл в том же самом месте. Кластер обеспечен собственными генерирующими мощностями, включёнными в единую энергосистему [16, 18].

Научные эксперименты в рамках экоориентированных технологий по направлениям EcoHouse и uEnergy успешно реализуются в ЭкоТехноПарке и экопарке «Акварель» (г. Марьина Горка, Беларусь). Там уже построено и эксплуатируется несколько типов инновационных зданий и сооружений, в том числе с субтропической оранжереей и садом внутри дома, устроенными по принципу автономно-замкнутой природной экосистемы.

Данный принцип естественным образом адаптирует застройку к любым географическим условиям и природно-климатическим особенностям местности. Он применим в морских и горных частях экваториальной зоны. Ряды сблокированных домов размещаются на организованных террасах и принимают форму, соответствующую рельефу. Транспортные комплексы второго уровня снимают ограничения, свойственные горной местности (большие перепады высот), и не препятствуют доступу к объектам ЭЛГ. Инженерные коридоры выпрямляются и значительно снижают протяжённость основных коммуникаций. Ранее труднодоступные территории, в том числе на экваторе (на суше и море), становятся привлекательными и удобными для жизни.

Общепланетарная транспортная система инженера Анатолия Юницкого

Сложно прогнозировать, как в дальнейшем станет развиваться земная и космическая техника. Единственное, что можно утверждать с полной уверенностью, – она будет подчиняться фундаментальным законам физики нашего реального материального (а не виртуального цифрового) мира. Природные законы, многократно проверенные практикой, останутся справедливыми во все времена

в нашей Вселенной. В области механики к их числу относятся четыре закона сохранения: энергии, импульса, момента импульса и движения центра масс системы, к которым сводятся остальные частные законы сохранения.

Именно по этим физическим (а не, например, философским) законам спроектирован современный транспорт: телеги, велосипеды, автомобили, поезда, корабли, самолёты, вертолёты, ракеты. И будущий геокосмический транспорт не станет исключением [1, 2, 15, 16].

Проектируемая геокосмическая транспортная система должна также отвечать целому ряду дополнительных критериев:

- представлять собой не стационарное сооружение длиной в тысячи километров, а самонесущий летательный аппарат сверхбольшой грузоподъёмности – не менее 1 млн тонн;
- использовать только внутренние силы, минимизируя какие-либо взаимодействия с окружающей средой и исключая непрерывное линейное опирание на поверхность земли;
- иметь КПД, близкий к 100 %, а производительность – миллионы тонн в год (в перспективе – миллиарды тонн);
- при спуске на Землю обеспечивать рекуперацию потенциальной и кинетической энергии космических грузов и собственной конструкции с КПД, близким к 100 % (в противном случае гигантское тепловыделение уничтожит систему);
- геокосмический летательный аппарат должен потреблять электрическую энергию, при этом мощность его привода в пересчёте на тонну груза должна быть невысокой – около 100 кВт (как у легкового электромобиля; удельная мощность ракеты-носителя в 10 000 раз выше – 1 млн кВт на тонну груза);
- ускорение разгона и торможения при геокосмических перевозках должно быть комфортным для пассажиров и приемлемым для грузов (менее 1 м/с^2), время выхода на орбиту и разгона до первой космической скорости должно исчисляться в часах, а не в минутах (как у ракеты-носителя) или сутках (как у космического лифта).

С позиций физики самый экологически чистый геокосмический летательный аппарат, использующий для выхода в космос только внутренние силы, имеет единственный вариант исполнения – самонесущая кольцевая конструкция, охватывающая планету в плоскости экватора, с центром масс, совпадающим с центром масс Земли.

Всем перечисленным выше критериям отвечает только одно инженерное решение – ОТС, разработанное инженером Анатолием Юницким. Оно представляет собой тороидальную конструкцию с поперечным размером около 2 м, опоясывающую планету в плоскости экватора и имеющую в своей сердцевине ленточные маховики, размещённые в вакуумных каналах.

Маховики, разгоняемые линейными электродвигателями до космических скоростей (примерно 10 км/с), за счёт центробежных сил обеспечивают необходимую подъёмную силу. Переключение тяги с одного маховика на другой приводит корпус ОТС во вращение вокруг планеты, вплоть до получения первой космической скорости на заданной экваториальной круговой орбите, например на высоте 400 км. При подъёме на каждые 100 км над поверхностью Земли диаметр кольца ОТС симметрично увеличивается во все стороны относительно центра на 1,57 %, при этом положение центра масс ОТС всегда остаётся неизменным и совпадает с центром масс планеты.

Концепт ОТС разработан около 50 лет назад. За это время он многократно исследован и проверен расчётными методами, которые подробно описаны в научно-популярных публикациях автора[1], а также в его первой научной монографии[2] более 30 лет назад.

ОТС – единственно возможное техническое решение с позиций фундаментальных законов физики, в котором транспортная система (точнее, самонесущий летательный аппарат) способна выводить грузы на различные круговые экваториальные орбиты исключительно с использованием электрической энергии, без реактивных двигателей, применяя лишь внутренние силы системы, без какого-либо энергетического, механического, химического и других видов взаимодействия с окружающей средой, в том числе с атмосферой и её озоновым слоем. Таким образом, ОТС является предельно экологически чистым решением для геокосмической логистики на любой планете, включая Землю. По своей инженерной сути ОТС – гигантский электромобиль с единственным мотор-колесом диаметром 12 756 км.

За один рейс ОТС способно выводить на орбиту около 10 млн тонн грузов и 10 млн пассажиров, которые будут задействованы в создании и функционировании околоземной космической индустрии, обслуживающей нужды земной цивилизации.

---

[1] Юницкий, А. Пересадочная, космическая, кольцевая / А. Юницкий // Изобретатель и рационализатор. – 1982. – № 4; Юницкий, А. В космос... на колесе / А. Юницкий // Техника – молодёжи. – 1982. – № 6; Юницкий, А. «Спасательный круг» планеты / А. Юницкий // Век XX и мир. – 1987. – № 5.

[2] Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А.Э. Юницкий. – Гомель: Инфотрибо, 1995. – 337 с.: ил.

За один год ОТС сможет выходить в космос до 100 раз. При этом себестоимость доставки каждой тонны полезного груза на орбиту окажется в тысячи раз ниже, чем у традиционных ракет-носителей, и составит менее 1000 USD/т. Значит, цена пассажирского билета на орбиту будет в пределах 100 USD при комфорте путешествия, превышающем удобство современного высокоскоростного поезда.

ОТС является струнной технологией, так как его корпус должен быть слегка растянут (усилие в пределах 100 тонн) на всех этапах геокосмической логистики: при взлёте, нахождении на орбите и посадке на Землю. Это необходимо для повышения устойчивости линейной конструкции, имеющей длину около 40 000 км и крайне низкую относительную толщину – отношение примерно 1 : 20 000 000. Кроме того, наличие продольного растяжения даст радиальную (вертикальную) составляющую в дополнение к тонко настроенной балластной системе геокосмического летательного аппарата для выхода на заданную (с точностью до метра) орбитальную высоту. Например, продольное усилие в 100 тонн обеспечит радиальное усилие около 16 г/пог. м этой гигантской кольцевой конструкции.

Космическое индустриальное ожерелье «Орбита» и ЭкоКосмоДом

Будущая космическая индустрия должна быть расположена максимально близко к конечному потребителю – земной цивилизации, численность которой со временем достигнет 10 млрд человек, продолжающих жить в своём общем доме – на планете Земля. Это упростит, ускорит и удешевит геокосмическую логистику. Так как космическая индустрия включит в себя огромное множество составных элементов (заводы, цеха, лаборатории, технологические платформы, солнечные электростанции, жилые космические дома и др.), то планируется освоить несколько индустриальных экваториальных орбит, не пересекающихся друг с другом. При этом целесообразно предусмотреть возможность вертикального перехода между смежными орбитами, а значит, они должны располагаться в единой экваториальной плоскости планеты. Освоение данных орбит энергетически более выгодно, поскольку будет задействована линейная скорость вращения поверхности планеты (максимальная на экваторе – 1674 км/ч).

Практическая индустриализация околоземного космического пространства начнётся с первыми полётами ОТС. Прежде всего будет возведено КИО «Орбита» – многофункциональный транспортно-инфраструктурный и индустриально-жилой орбитальный комплекс, который необходим для обеспечения земного человечества произведённой в космосе продукцией. Представляет собой единое кольцо кластерного типа, опоясывающее Землю в плоскости экватора на низкой круговой орбите – на высоте примерно 400 км. Общая протяжённость КИО «Орбита» на этой высоте – около 42 520 км.

Несмотря на автоматизацию и роботизацию, развёрнутые в космосе, индустрию должны обслуживать люди, ради которых она и будет создана. Рост численности населения планеты и развитие производств в околоземном пространстве приведут к увеличению количества рабочих мест на орбите. Поскольку здесь можно построить рекреационные комплексы с уникальными характеристиками, отдельную категорию обитателей составят туристы и отдыхающие. По этой причине на КИО «Орбита» необходимо сооружать ЭкоКосмоДома (ЭКД) – жилые поселения нового кластерного типа, в которых станут жить, работать, отдыхать, проходить курсы терапии миллионы человек.

В ЭКД, рассчитанном на несколько тысяч жителей, будут воспроизведены гравитация (центробежными силами) и лучшая часть земной биосферы субтропического типа со всеми важными природными факторами: атмосферой, разнообразием ландшафтов, плодородных почв, живых организмов, в том числе агрономически ценных почвенных микроорганизмов, земных биогеоценозов, водных экосистем и др.

Технологическая платформа «ЭкоКосмоДом» – это проект строительства в космосе сооружений с внутренним обитаемым пространством, изолированным от внешней агрессивной космической среды – вакуума и радиации. В ЭКД будет создана замкнутая экосистема земного типа, включающая искусственно полученную гравитацию, живую плодородную почву, флору и фауну (в том числе микрофлору и микрофауну), атмосферу с регулируемыми параметрами (температура, влажность и др.) для неограниченно длительного, автономного, экокомфортного проживания и деятельности как отдельных людей и их групп, так и многотысячных поселений на экваториальных орбитах планеты, а также в открытом ближнем и дальнем космосе.

Атмосфера будет сформирована в соответствии с земными показателями давления, состава, влажности и температуры. Поскольку организм человека, как и всех животных и растений, получает влагу не только с питьевой водой и продуктами питания, но и из воздуха, то влажность в космическом доме должна оставаться оптимальной круглый год (55–60 %), а температура воздуха – поддерживаться в комфортном диапазоне (21–25 °C). При необходимости все

параметры атмосферы ЭКД можно регулировать в течение как суток, так и года.

В космосе земные сутки и год приобретают другой смысл, ввиду того что ЭКД совершает один оборот вокруг планеты примерно за 1,5 ч, т. е. 16 раз за сутки. Значит, в орбитальном доме нужно искусственное освещение, а сутки и год могут быть оптимизированы и не равняться 24 ч и 365 суткам соответственно. Для полноценного развития растений интенсивность света должна находиться на уровне более 1000 лк. Источником освещения будет выступать Солнце – с помощью специальных зеркал и линз или через преобразование в электроэнергию.

Обеспечить комфортное проживание человека можно только при максимально полном моделировании биосферы планеты, в том числе всего богатства флоры и фауны, включая почвенный биогеоценоз [3, 4, 15, 16]. Без здоровой плодородной почвы в космическом доме невозможно создать комфортные и безопасные условия для проживания, так как именно почва с тысячами видов агрономически ценных микроорганизмов и земляными червями по своей биологической сути является иммунной системой земной биосферы.

Биосферный комплекс космического дома должен постоянно вырабатывать кислород, обязательный для дыхания людей и животных, производить здоровую пищу и утилизировать в гумус отходы жизнедеятельности всех находящихся там живых организмов.

Конструктивная часть жилого кластера «ЭкоКосмоДом» может быть представлена геометрическими телами – пустотелой сферой, цилиндром, тором или их комбинациями – диаметром 200–500 м, вращающимися вокруг своей оси симметрии. Массивные космические поселения необходимо выполнять спаренными на одной оси, что позволит осуществить их первоначальную раскрутку и вращение в противоположные стороны с помощью электрических, а не реактивных двигателей.

В космосе, как и на околоземной орбите, имеются метеоритная и радиационная опасности. Наиболее эффективная защита от этих угроз – толстые многослойные преграды, в качестве которых могут выступать находящиеся внутри ЭКД пеноматериалы, многометровый слой почвы, а также воздух и вода – грунтовая и поверхностная (в водоёмах). Несущая оболочка космического дома, изготовленная из высокопрочных материалов (к примеру, композитных), с толщиной стенки около 5 мм – самая нематериалоёмкая его часть.

На внутренней стороне оболочки, поверх пористой противометеоритной и противорадиационной защиты, будет насыпан слой живой плодородной почвы толщиной не менее 1–2 м, посажены леса, сады, луга со своими биогеоценозами, созданы экосистемы водоёмов с пресной и морской водой. Наклонную часть почвы, ближе к оси вращения ЭКД, планируется реализовать с горными пейзажами, ручьями и водопадами, предгорными экосистемами. Воздух в космическом доме наполнится запахами цветов и полезными фитонцидами – их благоприятное действие на организм человека не идёт в сравнение ни с какими лекарствами. Шума в орбитальном жилом доме не будет – только пение птиц и шорох листвы деревьев от лёгкого ветерка.

Орбитальные струнные дороги и орбитальная логистика

КИО «Орбита» в виде ожерелья из заводов, фабрик и ЭКД является единой кольцевой струнной системой. Это кольцо должно быть растянуто до усилий около 1000 тонн, что даст радиальную составляющую примерно 160 г/пог. м конструкции. КИО «Орбита» займёт более низкую орбитальную высоту, чем могли бы занять его объекты, не объединённые в ожерелье. Орбитальная скорость комплекса будет немного выше первой космической для данной высоты орбиты. Предварительное напряжение улучшит устойчивость индустриального кольца при внешних воздействиях солнечного ветра и аэродинамического торможения в верхних слоях атмосферы (т. е. в термосфере).

ОТС должно загружаться равномерно распределённым по длине полезным грузом, например массой 250 кг/м (2,5 тонны на 10 м, или 25 тонн на 100 м). Доставлять его необходимо на определённый орбитальный завод или конкретный ЭКД, размещённые друг от друга на достаточно больших расстояниях (на начальных этапах индустриального освоения космоса могут достигать тысяч километров), поэтому грузы и пассажиров нужно будет развозить вдоль КИО «Орбита» на многие километры.

Несущую (растянутую) часть КИО «Орбита» следует сконструировать в виде орбитальных (кольцевых) рельсострунных дорог, которые обеспечат безракетную логистику между всеми кластерами индустриального кольца. Наиболее целесообразно струнные рельсы выполнить плоскими (в виде высокопрочных лент, стальных или композитных), тогда орбитальный юнимобиль, имеющий пары колёс, обжимающие рельс с двух сторон, в состоянии невесомости сможет обеспечить требуемое сцепление и соответствующую тягу. Подобных орбитальных дорог может быть несколько: грузовые, пассажирские, высокоскоростные;

их общая материалоёмкость и стоимость зависят не столько от количества струнных рельсов, сколько от суммарного натяжения. Такие дороги должны быть бирельсовыми, чтобы при разгоне и торможении юнимобиля его центр масс находился в плоскости рельсовой колеи и в рельсе не возникали изгибающие моменты.

Струнные орбитальные дороги – компактные и недорогие. Например, струнный рельс, армированный углеволокном, при предварительном натяжении 125 тонн будет иметь поперечные размеры 80 × 10 мм и погонную массу около 3 кг/м. Если же построить четыре бирельсовые орбитальные дороги, то их суммарное натяжение составит 1000 тонн, а общая масса путевых структур – 24 кг/м. То есть всю орбитальную транспортную сеть (восемь однопутных или четыре двухпутные дороги) можно возвести из материалов всего одного узкоколейного железнодорожного рельса Р-24 (его погонная масса равна 24,9 кг/м) такой же длины.

Поскольку нет смысла ОТС стыковаться с КИО «Орбита» всей своей длиной (42 520 км) с тысячами, если не миллионами, размещённых снаружи гондол и контейнеров, то лучше зависать на расстоянии около 1 км от орбитального индустриального ожерелья. Это повысит безопасность геокосмической логистики, поскольку в случае сбоев, например в системах управления, балластной системе или в линейных электродвигателях ленточных маховиков, этот миллионнотонный самонесущий летательный аппарат не врежется в индустриальное кольцо, что в противном случае может привести к катастрофическим последствиям.

В пассажирских капсулах, как и в грузовых, будет максимально комфортно, когда пол находится под ногами, а не, например, над головой или за спиной. При выходе на орбиту положение пола относительно продольной оси ОТС будет постоянно меняться. Во время нахождения на экваториальной эстакаде пол окажется внизу, однако в процессе подъёма и разгона до первой космической скорости вес (вертикально действующая сила гравитации) уменьшится до нуля за счёт плавного увеличения компенсирующей центробежной силы по мере роста окружной скорости. При этом будет действовать ещё одно ускорение – разгонное – и появится дополнительная горизонтальная сила. В итоге положение виртуального пола, направленного перпендикулярно результирующей силе, начнёт смещаться назад, за спину пассажиров.

Для устранения данного дисбаланса нужно во время путешествия поворачивать пассажирскую капсулу вокруг своей поперечной оси таким образом, чтобы пол всегда был внизу, что, например, необходимо при посещении туалетной кабинки. При выходе на орбиту наступит невесомость (вернее, микрогравитация), а гондолы окажутся в вертикальном положении относительно Земли, т. е. перпендикулярно продольной оси ОТС. В подобном положении их можно перемещать с помощью реактивных микродвигателей к транспортной системе КИО «Орбита», а затем адресно развозить вдоль орбиты рельсо-струнным транспортом.

Рельсо-струнный транспорт на других планетах и Луне

Требования к транспорту будущего и преимущества струнных технологий справедливы при индустриальном освоении и других планет и их спутников, поскольку законы физики одинаковы везде во Вселенной. Альтернативы uST по ресурсоёмкости, энергоэффективности, безопасности и иным параметрам там также не предвидится. Кроме того, нецелесообразно строить стационарные дороги на поверхности небесных тел в случае разовых посещений, поэтому в настоящем исследовании такие сценарии не анализируются.

Рассмотрим использование uST при индустриальном освоении Луны, когда потребуется перевозка миллионов тонн грузов ежегодно. На Луне – вакуум, значит, отсутствует аэродинамическое сопротивление; следовательно, форма юнимобилей может быть любой, обусловленной технологическими особенностями перевозимых грузов. Ускорение свободного падения на Луне – 1,625 м/с^2, значит, и путевая структура, и машины, и грузы будут там примерно в шесть раз легче, чем на Земле.

Оптимальная схема выполнения рельсо-струнной эстакады на Луне – с перепадом высот между точками *A* и *B* (рисунок 3а). Если выполнить дорогу монорельсовой и натянутой до 50 тонн, то сталекомпозитный плоский рельс поперечным сечением 40 × 10 мм будет иметь массу около 1 кг/м, а лунный вес – 0,167 кгс/м. Такая дорога может проходить пролётами 2,5 км с провисом 2,3 м, а под весом гружёного юнимобиля массой 10 тонн (лунный вес 1,67 тонны) прогиб монорельсового пути составит 22,6 м, что позволит юнимобилю разгоняться под действием лунной гравитации до скорости 32 км/ч. На 10-километровой трассе, например от места добычи и обогащения руды до стартового космодрома, между крайними точками потребуется перепад высот около 10 м, если коэффициент сопротивления качению стального колеса по стальной ленточной головке рельса будет равен 0,001.

Если начальную опору поднять на высоту 40 м, то неприводной юнимобиль (фактически простейшая тележка) скатится в конец трассы с максимальной скоростью 32 км/ч. Если же разгруженный юнимобиль в конце трассы также поднять на 40 м, то он скатится по обратной линии с такой же максимальной скоростью. Подобную дорогу электрифицировать не нужно, а лунному юнимобилю не требуются двигатель и тормоз (гасить избыточную скорость в конце пути возможно и внешними тормозами). По концам трассы необходимо только поставить механизмы (лифты) для подъёма машин на 40-метровую отметку.

Такая инопланетная логистика характеризуется минимальными ресурсоёмкостью и стоимостью при максимальной энергоэффективности, что не имеет аналогов среди других известных транспортных решений как настоящего времени, так и будущего.

Кроме того, при широкомасштабном индустриальном освоении Луны на её поверхности можно построить мини-ОТС длиной 10 920 км с эстакадой, идущей только по суше (в отличие от Земли здесь нет океанов). Первая космическая скорость на Луне – 1,68 км/с (в 4,71 раза ниже, чем на Земле, т. е. потребуется кинетическая энергия в $4{,}71^2$ = 22,17 раза меньшая), а тяжесть – в шесть раз ниже земной. Там не нужны вакуумные каналы, поскольку кругом вакуум. Следовательно, ресурсоёмкость лунного ОТС может быть снижена на два порядка (до 10 кг/м). Такую экваториальную лунную логистическую систему вполне реально построить, если потребность в лунно-космических перевозках достигнет 1 млн т/год, с чем ракетно-космическая логистика однозначно не справится, хотя это не так уж и много для 10-миллиардного человечества – всего по 100 г сырья и лунной продукции на одного землянина ежегодно.

Заключение

Человек выбрал технологический путь цивилизационного развития около 2 млн лет назад, когда создал первые инженерные технологии, в том числе зажёг костёр и стал готовить на нём пищу. Именно от первого костра пошли все индустриальные технологии, в том числе транспортные, связанные с горением топлива: паровой двигатель и паровоз, ДВС и автомобиль, турбореактивный двигатель и самолёт, реактивный двигатель и ракета.

Монорельс, поезд на магнитной подушке, наземный и подземный метрополитен, скоростной трамвай, канатная дорога, функционирующие в настоящее время на нашей планете, по ряду причин не могут быть универсальным чистым транспортом, способным реально преодолеть глобальные экологические и социально-экономические вызовы, стоящие перед человечеством.

Наиболее близко отвечает всем требованиям, предъявляемым к земному транспорту будущего, технология uST, однако ей ещё предстоит быть внедрённой и опробованной не в опытной, а в массовой коммерческой эксплуатации. При успехе подобного использования технология струнного транспорта может стать основой для создания новой транспортно-инфраструктурной отрасли, причём не только земной, но и геокосмической (на трассе «Земля – Орбита – Земля» в виде ОТС) и космической (на земной орбите, других планетах и Луне).

Только uST может обеспечить будущую мобильность населения на втором уровне в логике чистого транспорта, решить локальные и общецивилизационные логистические задачи бурно растущей мировой экономики, а также большинство глобальных проблем экологического, климатического и социально-экономического характера.

В настоящей работе дано обоснование необходимости ещё большего повышения эффективности транспортно-инфраструктурного комплекса uST. Выделены ключевые требования, предъявляемые к городскому транспорту, который характеризуется прерывистым движением из-за частых остановок, обусловленных пробками, перекрёстками, светофорами, пешеходными переходами и другими факторами, что приводит к снижению средней скорости движения и кратному перерасходу энергии (топлива), увеличению загрязнения городской среды выхлопными газами, продуктами износа шин и асфальта, а также к интенсивному шумовому загрязнению. Математически доказано, что перенос городского трафика на второй уровень с применением транспортных технологий uST провисающего типа позволит существенно (более чем в 10 раз) повысить параметры энергоэффективности функционирования городской логистики при одновременном снижении ресурсоёмкости и стоимости городской транспортной системы и её инфраструктуры.

Обосновано, что единственной геокосмической транспортной системой, которая способна обеспечить вынесение в космос земной индустрии и создание КИО «Орбита» на низких круговых экваториальных орбитах, является ОТС. Только оно, работая исключительно на электрической энергии и опираясь на свои внутренние (центробежные) силы, может наладить индустриально значимую пассажирскую (до 10 млн пассажиров за один рейс) и грузовую (до 10 млн тонн грузов за один рейс) геокосмическую логистику при снижении себестоимости перевозок (на орбиту и обратно) в тысячи раз – менее 1000 USD/т.

Показано, что индустриальное освоение других планет и Луны при масштабных объёмах перевозок тоже наиболее целесообразно осуществлять с помощью рельсо-струнных комплексов uST провисающего типа.

Внедрение инновационных отраслеобразующих струнных технологий, и не только земных транспортных, – это вызов. Его надо принять людям, странам, всему человечеству, ведь от смелости и быстроты решений зависят не только частные проблемы, связанные с климатическими изменениями, но и вопросы глобального выживания человечества и сохранения нашей инженерной цивилизации и нашего общего дома – биосферы планеты Земля.

Список основных источников

1. *Юницкий, А.Э. Космический вектор цивилизационного развития: сб. пленар. докл. междунар. науч.-техн. конф. «Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты» (1988 г.; 2019–2023 гг.) / А.Э. Юницкий. – Минск: СтройМедиаПроект, 2023. – 328 с.*
2. *Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А.Э. Юницкий. – Силакрогс: ПНБ принт, 2019. – 576 с.*
3. *Юницкий, А.Э. Цивилизационная ёмкость космического дома по имени Планета Земля / Анатолий Юницкий. – Минск, 2021. – 148 с.*
4. *Юницкий, А.Э. Инженер Мира: автобиография / Анатолий Юницкий. – Минск: СтройМедиаПроект, 2023. – 500 с.: ил.*
5. *Smith, M.N. The Number of Cars Worldwide Is Set to Double by 2040 / M.N. Smith // World Economic Forum. – URL: https://www.weforum.org/stories/2016/04/the-number-of-cars-worldwide-is-set-to-double-by-2040/. – Publ. date: 22.04.2016.*
6. *Myers, J. Countries with the Most and Least Road Traffic Deaths / J. Myers // World Economic Forum. – URL: https://www.weforum.org/stories/2015/10/countries-with-the-most-and-least-road-traffic-deaths/. – Publ. date: 21.10.2015.*
7. *Unequal Costs of Climate Change // International Monetary Fund. – URL: https://www.imf.org/wp-content/uploads/2022/03/Climate-Blog-Chart-v2.jpg (date of access: 04.05.2025).*
8. *Юницкий, А.Э. Программа перезагрузки экономики Союзного государства России и Беларуси на биосферный путь цивилизационного развития / А.Э. Юницкий. – Минск, 2022. – 132 с.*
9. *Global Energy Review: CO_2 Emissions in 2021 // IEA. – URL: https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2 (date of access: 04.05.2025).*
10. *Пигарев, А. Специалист Volvo Cars: «Причина 94 % аварий – человеческий фактор» / А. Пигарев // РБК. – URL: https://style.rbc.ru/people/5f8ea6279a79470a3ad03df6. – Дата публ.: 26.10.2020.*
11. *The $25bn Light Rail Boom // MEED. – URL: https://www.meed.com/the-25bn-light-rail-boom. – Publ. date: 29.09.2009.*
12. *Dubai Tram // Wikipedia. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Dubai_Tram (date of access: 04.05.2025).*
13. *Устойчивое развитие населённых пунктов и улучшение их коммуникационной инфраструктуры с использованием струнной транспортной системы: итоговый отчёт по проекту Центра ООН по населён. пунктам (Хабитат) FS-RUS-98-S01 / рук. проекта А.Э. Юницкий. – М., 2000. – 179 с.*
14. *Обеспечение устойчивого развития населённых пунктов и защита городской окружающей среды с использованием струнной транспортной системы: заключ. отчёт по проекту Программы ООН по населён. пунктам FS-RUS-02-S03 / рук. проекта А.Э. Юницкий. – М., 2004. – 158 с.*
15. *Юницкий, А.Э. Инженерия. Мир как инженерный проект / Анатолий Юницкий. – Минск: СтройМедиаПроект, 2023. – 320 с.*
16. *Юницкий, А.Э. Программа «ЭкоМир» / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 24–77.*
17. *Пустыни / А.Г. Бабаев, Н.Н. Дроздов, И.С. Зонн, З.Г. Фрейкин. – М.: Мысль, 1986. – 320 с. – (Природа мира).*
18. *Юницкий, А.Э. Экваториальный линейный город: особенности строительства / А.Э. Юницкий, М.М. Давыдик // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы IV междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 18 сент. 2021 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2022. – С. 101–115.*

УДК 629.784

Моделирование полёта общепланетарного транспортного средства

А.Э. Юницкий
доктор философии транспорта

В.Л. Лукша

ООО «Астроинженерные технологии»,
г. Минск, Беларусь

ЗАО «Струнные технологии»,
г. Минск, Беларусь

Система управления бортовыми исполнительными механизмами, отвечающими за безопасный полёт общепланетарного транспортного средства (ОТС), чрезвычайно сложна. ОТС состоит из одинаковых сегментов, каждый из которых имеет линейные двигатели, обеспечивающие разгон роторов, стабилизацию их скорости и режим отбора мощности; линейную балластную систему, регулирующую линейную массу ОТС на этапах подъёма и спуска; блок управления аппаратурой, включающий подсистему управления линейными двигателями роторов и приводами аэродинамических рулей-стабилизаторов, которые представляют собой внешние аэродинамические плоскости с регулируемым углом установки, необходимым для выполнения манёвров по вертикали и горизонтали при воздействии локальных внешних сил.

Цель работы – создание модели полёта ОТС, а также подсистем управления линейными двигателями роторов, приводами аэродинамических рулей-стабилизаторов и балластной системой. Исследование базируется на моделировании в среде MATLAB. Предложенная математическая модель предусматривает динамику прецессионного движения ОТС под действием внешних моментов, функционирование пятифазных синхронных линейных двигателей роторов (с алгоритмами компенсации аварийных режимов, таких как обрыв фаз), наличие подсистемы позиционирования аэродинамических плоскостей с бесколлекторными приводами, а также влияние изменяющихся параметров атмосферы и широты старта. Для описания пространственного вращения использован математический аппарат кватернионов, исключающий вырожденные состояния углов Эйлера.

Разработанная математическая модель станет основой для проектирования надёжной системы автоматического управления, способной обеспечить безопасный и эффективный выход ОТС на орбиту.

Ключевые слова:
выход на орбиту, космическое индустриальное ожерелье «Орбита» (КИО «Орбита»), моделирование, общепланетарное транспортное средство (ОТС), прецессия.

UDC 629.784

Flight Modeling of General Planetary Vehicle

A. Unitsky
Dr. of Philosophy
in Information Technologies
(Transport)

V. Looksha

Astroengineering Technologies LLC,
Minsk, Belarus

Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

The control system for the onboard actuators that ensure the safe flight of the General Planetary Vehicle (GPV) is highly sophisticated. The GPV is composed of identical segments, each equipped with linear motors that accelerate the rotors and stabilize their speed and power take-off; a linear ballast system that regulates the linear mass of the GPV during ascent and descent; a control unit for the equipment, including a subsystem that controls the linear rotor motors and the aerodynamic elevator-stabilizer drives, which are external aerodynamic planes with adjustable installation angles that allow for vertical and horizontal maneuvers in response to local external forces.

The aim of this work is to create a flight model for the GPV, along with subsystems for controlling the linear rotor motors, the aerodynamic elevator-stabilizer drives, and the ballast system. The research is based on modeling within the MATLAB environment. The proposed mathematical model accounts for the dynamics of the GPV precessional motion under the influence of external moments, the operation of five-phase synchronous linear motors for the rotors (including algorithms for compensating emergency conditions such as phase loss), a positioning subsystem for the aerodynamic surfaces using brushless drives, and the impact of varying atmospheric parameters and launch latitude. A quaternion-based mathematical framework is utilized to describe spatial rotation, thereby excluding degenerate states of Euler angles.

The developed mathematical model will serve as the foundation for designing a reliable automatic control system capable of ensuring the safe and efficient orbital deployment of the GPV.

Keywords:
General Planetary Vehicle (GPV), Industrial Space Necklace "Orbit" (ISN "Orbit"), modeling, orbital deployment, precession.

Введение

Освоение ближнего космоса остаётся стратегической задачей, однако традиционные ракетные технологии сопряжены с высокими затратами и экологическими рисками. Ещё в 1982 г. белорусский инженер А.Э. Юницкий предложил мировой общественности безракетную альтернативу – проект геокосмической транспортной системы, предусматривающей выведение пассажиров и грузов на экваториальные орбиты посредством общепланетарного транспортного средства (ОТС) [1, 2].

Ключевой проблемой реализации ОТС является обеспечение устойчивости и управляемости данной сложной динамической системы в условиях внешних возмущений (гравитационные воздействия Луны и Солнца, атмосферные неоднородности и др.) и возможных внутренних отказов оборудования. Особая трудность – синхронизация движения ОТС с космическим индустриальным ожерельем «Орбита» (КИО «Орбита») для их безопасной стыковки.

Анализ научной литературы [3–11] из смежных областей космической динамики подтверждает актуальность постановки проблемы и определяет методические подходы для решения указанного вопроса.

В настоящей статье рассмотрена модель ОТС в виде блок-схем основных узлов этого гигантского по размерам (длина более 40 000 км) и массе (около 40 млн тонн) самонесущего летательного аппарата. Модель создана на базе MATLAB и учитывает ряд входных данных, постоянных и изменяющихся во времени.

Постановка задачи

Главная задача исследования – создание полной математической модели ОТС, включающей не только самонесущее транспортное средство, но и взлётно-посадочную эстакаду (uWay) и КИО «Орбита». Такая модель должна отражать информацию о работе геокосмического транспортно-инфраструктурного комплекса в целом, а также позволять анализировать относительные движения uWay, ОТС и КИО «Орбита». Реализация этой задачи предполагает поэтапный подход. На первом этапе выполнен общий расчёт полёта в идеальных условиях [2, 12–14]. На втором, текущем, этапе модель расширена: она учитывает внешние дестабилизирующие воздействия на корпус ОТС, возможные проблемы с питанием отдельных линейных электродвигателей и способы их компенсации; даёт полное описание движения ОТС. Кроме того, приняты во внимание изменения свойств атмосферы при подъёме и спуске, а также широта установки uWay.

Таким образом, цель работы – создание математической модели ОТС и подсистем управления линейными двигателями роторов и двигателями аэродинамических рулей-стабилизаторов.

Исходные данные

ОТС представляет собой корпус-тор, имеющий диаметр поперечного сечения около 2 м и опоясывающий Землю по экватору или параллельно ему. Внутри тора выполнены два продольных вакуумированных канала, в которых на магнитных подвесах движутся (вращаются вокруг планеты) два кольцевых линейных ротора (рисунок 1).

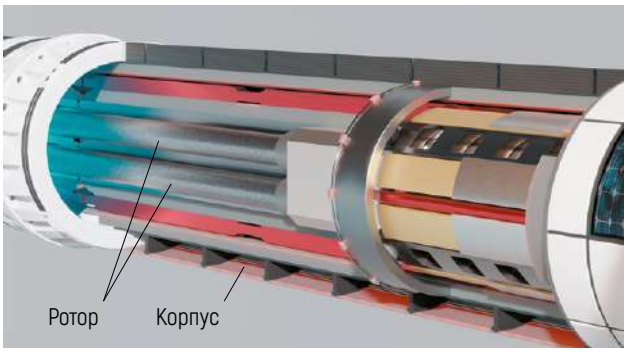


Рисунок 1 – Конструкция ОТС (вариант)

С точки зрения математической модели ОТС рассматривается как система из трёх гироскопов, у которых совпадают оси вращения. КИО «Орбита» и планета Земля заданы как свободные гироскопы. Результат работы динамической модели выражается массивом кватернионов, описывающих движение сегментов ОТС, поскольку любое перемещение в пространстве можно заменить вращением на некоторый угол вокруг конкретной оси. Эта ось определяется кватернионом.

Кватернион – комплексное число, имеющее вещественную часть, равную косинусу половины угла поворота, и мнимую часть, равную произведению координат вектора, вокруг которого происходит поворот на синус половинного угла поворота. В отличие от углов Эйлера кватернион лишён главного недостатка: если первый или второй угол равен 90°, то вращения вокруг разных осей могут приводить к одинаковым результатам.

Движение ОТС показано в виде массива вращений исходного кватерниона, описывающего начальное положение

оси вращения ОТС. Из кватернионов получены координаты векторов промежуточных положений. Из них в свою очередь вычислено изменение положения плоскости вращения ОТС.

Управление ОТС осуществляется путём изменения скоростей движения роторов, оболочки и регулирования угла установки аэродинамических рулей-стабилизаторов, а также за счёт работы маневровых реактивных двигателей (как части балластной системы, представленной, например, сжатым газом).

В качестве исходных данных для математической модели приняты значения переменных, приведённые в таблице 1.

Таблица 1 – Основные исходные данные для моделирования полёта ОТС

Параметр	Значение
Целевая высота орбиты относительно поверхности Земли, км	400
Высота эстакады, м	10

Математическая модель

Вследствие гравитационного воздействия Солнца и Луны плоскость, в которой обращается КИО «Орбита», не будет находиться строго над экватором Земли. Это утверждение справедливо и для ОТС: после отрыва от uWay геокосмический летательный аппарат начнёт медленно изменять плоскость своего вращения. Алгоритм управления предусматривает фазирование плоскости вращения ОТС по отношению к КИО «Орбита» при подъёме и по отношению к uWay во время спуска. Выделенных орбит для фазирования не предполагается.

Подсистема управления аэродинамическими плоскостями

Одной из подсистем, обеспечивающих следование по заданной траектории снижения на этапе прохождения сквозь плотные слои атмосферы, являются аэродинамические плоскости, расположение которых на корпусе ОТС представлено на рисунке 2. Рассмотрен вариант, когда на этапе прохода плотных слоёв атмосферы в управлении полётом участвуют аэродинамические рули-стабилизаторы, установленные, например, через каждые 50 м. Вертикальные плоскости корректируют курсовое положение, а горизонтальные позволяют выдерживать высоту над uWay. Кроме того, они добавляют стабильность положению корпуса ОТС.

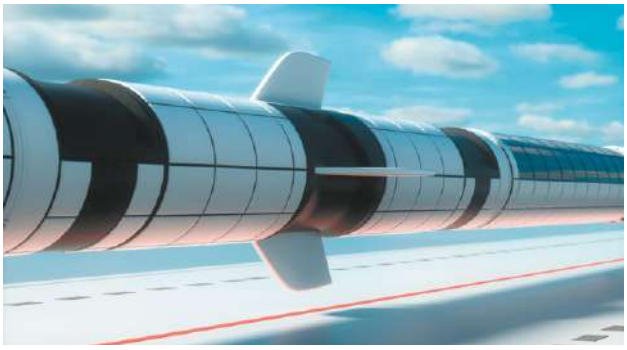


Рисунок 2 – Расположение аэродинамических плоскостей на корпусе ОТС (вариант)

Для моделирования работы подсистемы управления аэродинамическими плоскостями использовались основные исходные данные, приведённые в таблице 2.

Таблица 2 – Основные исходные данные для моделирования работы подсистемы управления аэродинамическими плоскостями

Параметр	Значение
Коэффициент подъёмной силы крыла	0,8
Скорость движения корпуса ОТС в плотных слоях атмосферы, м/с	55
Характерная площадь крыла, м^2	1,5
Интервал установки рулей-стабилизаторов, м	50
Сила дестабилизирующего воздействия, Н	1000
Плотность атмосферы на поверхности планеты, кг/м^3	1,255

На рисунке 3 представлена блок-схема подсистемы управления аэродинамическими плоскостями, созданная в среде графического программирования на основе MATLAB. Это часть математической модели, рассчитывающая углы установки аэродинамических рулей-стабилизаторов.

Красным цветом отмечены блоки, формирующие входные данные. Показатели статического и динамического давления, а также задания необходимого смещения (поворота) поступают на вход группы программных блоков, обведённых зелёным. Эти группы рассчитывают углы, требуемые для установки рулевых плоскостей.

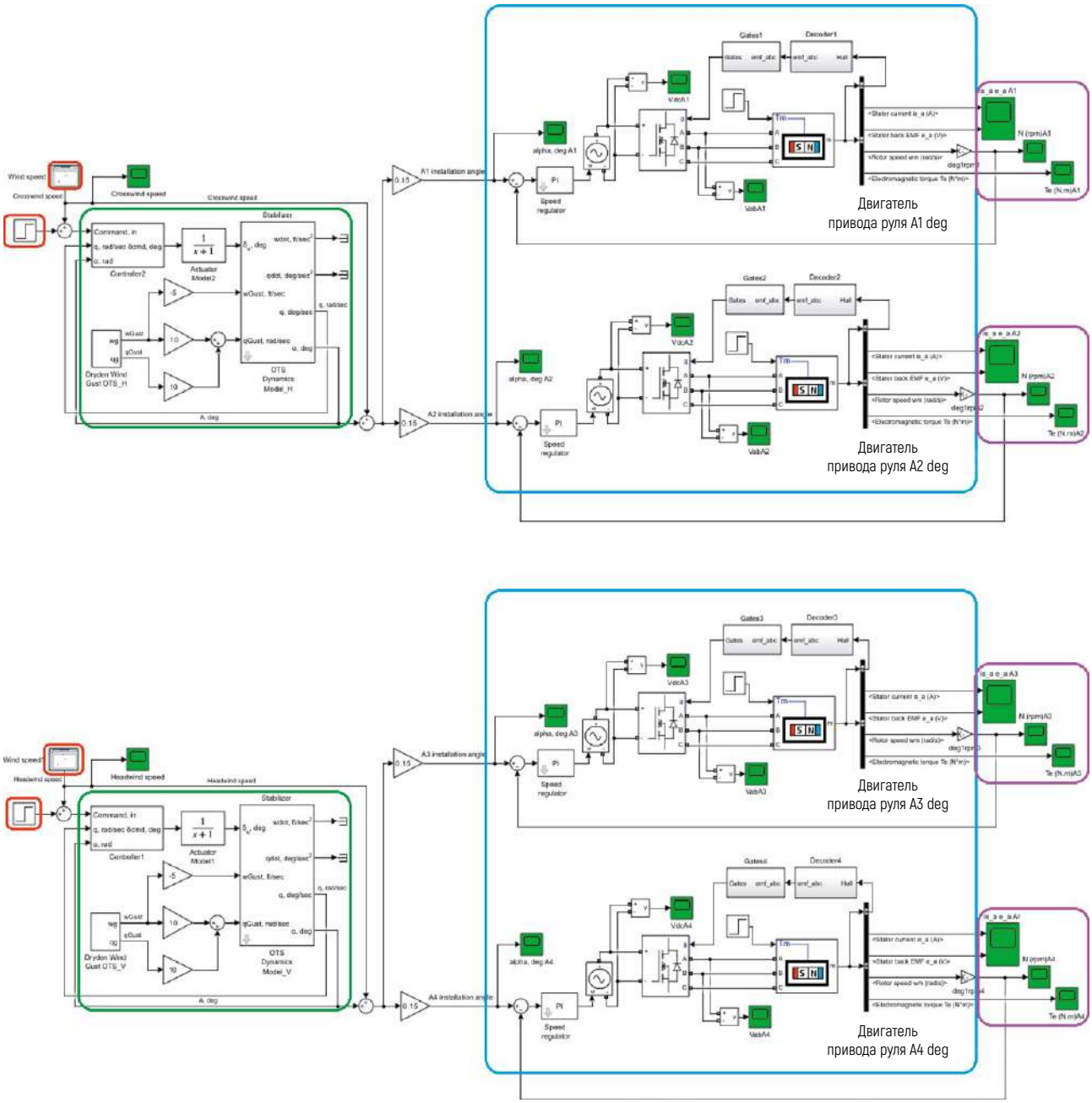


Рисунок 3 – Блок-схема подсистемы управления аэродинамическими плоскостями

Далее значение угла передаётся в группу блоков, выделенных синим цветом. Эти блоки моделируют работу трёхфазных инверторов и приводимых ими в действие бесколлекторных двигателей, которые через понижающий обороты редуктор устанавливают в нужное положение вал аэродинамической плоскости, жёстко закреплённой на валу и поворачиваемой вместе с ним.

Таким образом, система автоматически рассчитывает функции управления двигателями аэродинамических рулей-стабилизаторов, обеспечивая необходимый угол их установки (поворота). Показатели математической модели поступают для отображения в блоки осциллографов, которые на рисунке 3 обведены фиолетовым цветом. Соответствующие осциллограммы представлены на рисунках 4–8.

Ось аэродинамической плоскости связана с приводным двигателем через двухступенчатый редуктор с передаточным отношением 1700 : 1.

Расчёты свидетельствуют, что при коэффициенте подъёмной силы крыла, равном 0,8, плотности воздуха 1,255 кг/м^3, скорости движения корпуса ОТС 55 м/с максимальная стабилизирующая сила крыла площадью 1,5 м^2 составит 2225 Н.

На рисунках 4–8 изображены графики изменения основных параметров привода аэродинамической плоскости при приложении и удержании внешнего дестабилизирующего усилия, например, равного 1000 Н. В демонстрируемой модели дестабилизирующее усилие прикладывается к корпусу ОТС в поперечном направлении, т. е. в месте установки руля-стабилизатора.

На рисунках 4–8 проиллюстрирована работа привода вертикальных рулей-стабилизаторов, показаны режимы функционирования двигателя привода и угол поворота вертикальных плоскостей.

На рисунке 4 представлена зависимость силы тока статора от времени в ходе отработки задания, поступающего от группы блоков, обведённых синим цветом на рисунке 3.

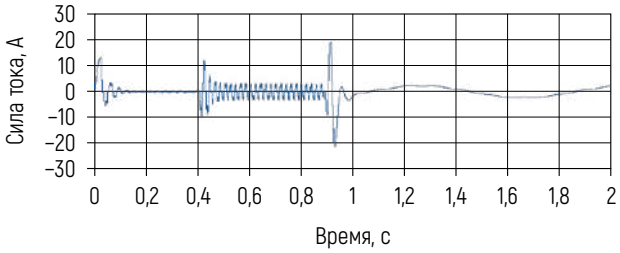


Рисунок 4 – Зависимость силы тока статора от времени

На рисунке 5 изображена форма питающего статор напряжения при отработке того же задания.

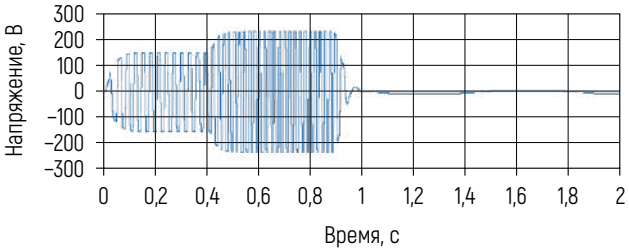


Рисунок 5 – Зависимость напряжения статора от времени

На рисунке 6 изображена зависимость частоты вращения вала приводного двигателя от времени.

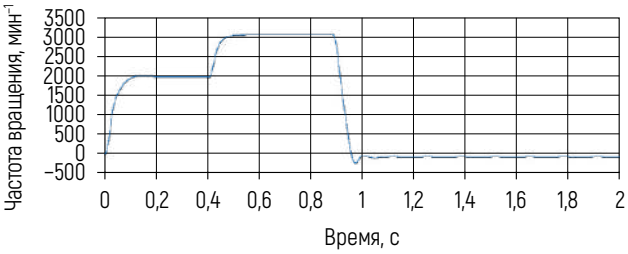


Рисунок 6 – Зависимость частоты вращения вала приводного двигателя от времени

На рисунке 7 изображена зависимость крутящего момента на валу приводного двигателя от времени.

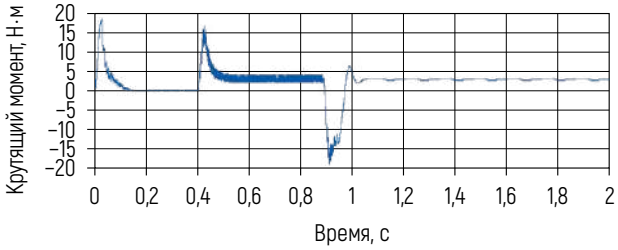


Рисунок 7 – Зависимость крутящего момента на валу приводного двигателя от времени

На рисунке 8 показано изменение угла установки аэродинамической плоскости от времени.

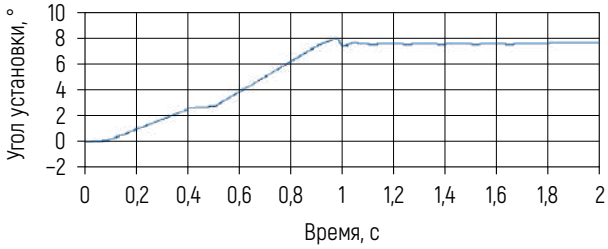


Рисунок 8 – Зависимость угла установки аэродинамической плоскости от времени

Модель рассчитывает угол поворота рулей-стабилизаторов, при котором создаётся сила, равная дестабилизирующему воздействию. Согласно одному из алгоритмов

движения ОТС на спуске (до входа в плотные слои атмосферы – на высоте 80 км) скорость движения оболочки устанавливается на уровне 55 м/с и не меняется до касания с uWay. Центр давления – точка пересечения линии действия полной аэродинамической силы с хордой крыла (рисунок 9, точка *B*) – совпадает с точкой крепления руля-стабилизатора к валу (рисунок 9, точка *A*) очень непродолжительное время. По мере спуска точка *B* переместится по хорде крыла от передней кромки к задней. Набегающий поток начнёт создавать крутящий момент (рисунок 9), который будет компенсироваться электродвигателем привода крыла. Червячная передача не применяется из соображений безопасности. В случае выхода из строя двигателя привода или потери питания аэродинамическая плоскость перейдёт в режим флюгирования и не станет производить усилия на корпус ОТС. Значит, чем существеннее дестабилизирующая сила, тем больше угол установки руля-стабилизатора и тем выше крутящий момент на валу двигателя, удерживающий руль-стабилизатор в заданном положении. На высоте 1 м над уровнем моря при дестабилизирующей силе 1000 Н и скорости движения корпуса ОТС 55 м/с угол установки аэродинамической плоскости составил 7,5°.

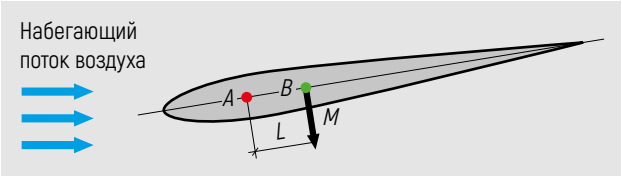


Рисунок 9 – Схема аэродинамической плоскости:
A – место положения приводного вала; *B* – центр давления;
L – плечо силы, поворачивающей руль-стабилизатор по потоку;
M – крутящий момент силы, поворачивающей руль-стабилизатор

Линейный электродвигатель линейного ротора

Исходные данные для описанной модели, необходимые для стартового разгона роторов в течение длительного времени, приведены в таблице 3.

Линейные двигатели, реализующие разгон и торможение линейных роторов ОТС, переброс мощности и импульса между роторами через корпус ОТС, а также обеспечивающие режим рекуперации электроэнергии, расположены вдоль всего сегмента. В одном из вариантов исполнения каждый ротор в рамках сегмента оснащён 35 пятифазными синхронными двигателями. Драйвер двигателя способен поддерживать стабильную мощность при аварийном обрыве одной и даже двух питающих фаз.

Таблица 3 – Исходные данные, принимаемые моделью (вариант)

Параметр	Значение
Удельная масса ротора 1, кг/м	1200
Удельная масса ротора 2, кг/м	250
Относительная скорость движения ротора 1 при отрыве, км/с	13
Относительная скорость движения ротора 2 при отрыве, км/с	0
Относительная скорость движения корпуса ОТС при отрыве, км/с	0
Количество фаз двигателя	5
Тяговое усилие, кН	10
Интервал установки двигателей, м	28,5

За время взлёта, подъёма на орбиту и достижения корпусом ОТС первой космической скорости с каждого метра ротора 1 необходимо перебросить 16,6 МДж энергии на ротор 2 и корпус. Максимальная мощность двигателя ротора 1 при этом достигнет 274 кВт, а максимальная мощность двигателя ротора 2 – 91 кВт.

На рисунке 10 приведён состав основных узлов сегмента ОТС.

На рисунке 11 показана часть модели, отвечающая за линейные двигатели. Красным цветом отмечены блоки, формирующие входные данные, а именно необходимую скорость движения роторов. Зелёным – блоки, которые генерируют управляющие сигналы для инверторов. Синим – пятифазные инверторы и пятифазные синхронные линейные электродвигатели. Фиолетовым – десятиканальный осциллограф, на входы которого поступают сигналы, отражающие напряжение на питающих фазах двигателей.

Инвертор, создающий напряжение питания линейных двигателей, обеспечивает стабилизацию заданного тягового усилия при аварийных ситуациях, которые связаны с обрывом одной либо двух жил силового кабеля, питающего двигатель. На рисунке 12 показаны результаты моделирования работы линейных двигателей в подобных аварийных режимах. При обрыве одной фазы (рисунок 12, синий цвет) драйвер увеличивает амплитуду напряжения оставшихся четырёх фаз и тем самым поддерживает заданное тяговое усилие на роторе. При обрыве двух фаз (рисунок 12, синий и оранжевый цвет) драйвер изменяет частоту и амплитуду оставшихся трёх питающих фаз и предотвращает падение тягового усилия. Моменты обрыва жил кабеля обозначены красными стрелками.

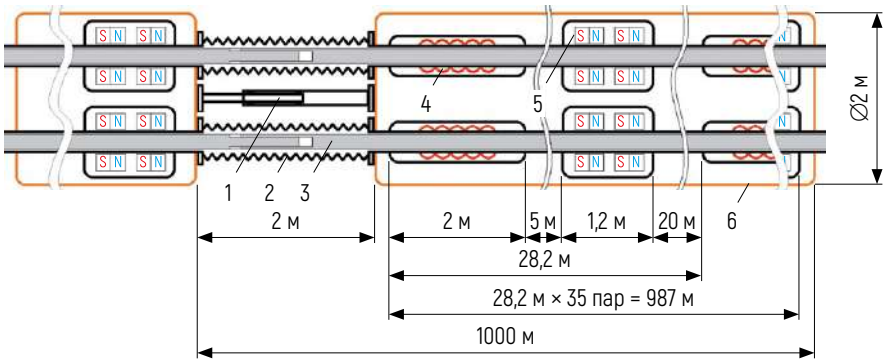


Рисунок 10 – Схема основных узлов сегмента ОТС:
1 – демпфирующий узел, обеспечивающий жёсткость корпуса при изменении длины ОТС во время полёта;
2 – сильфонный узел, обеспечивающий герметичность вакуумных каналов при изменении длины ОТС во время полёта;
3 – ротор; 4 – линейный электродвигатель; 5 – магнитный подвес роторов; 6 – корпус сегмента ОТС

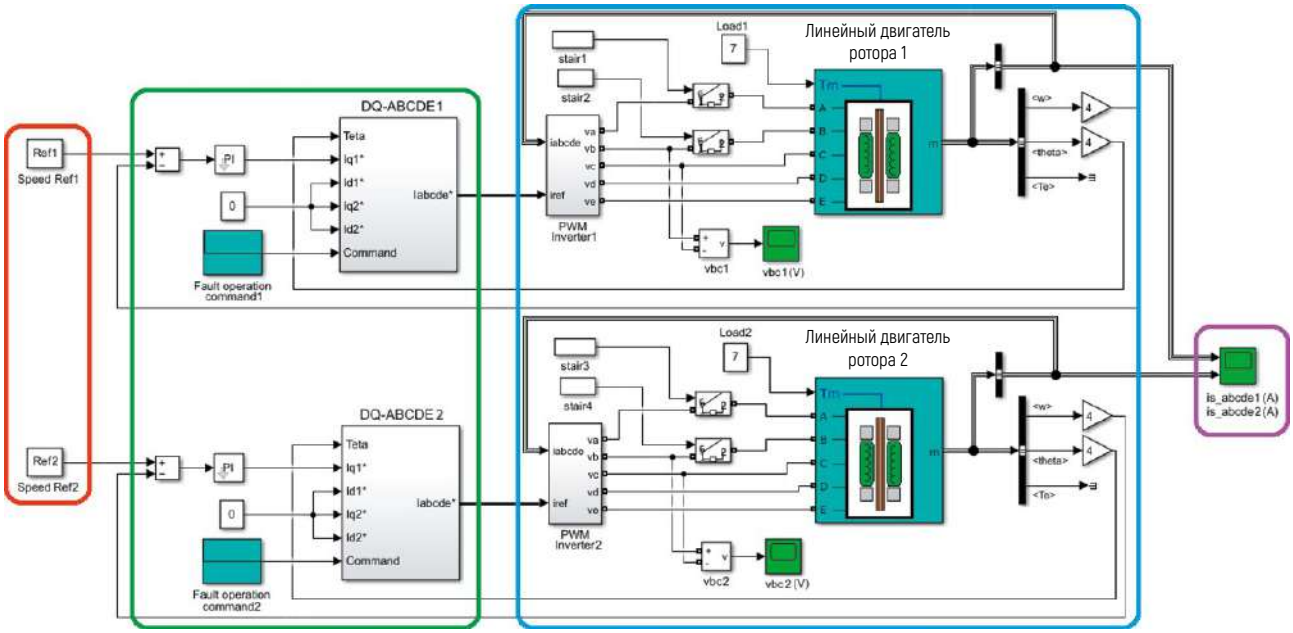
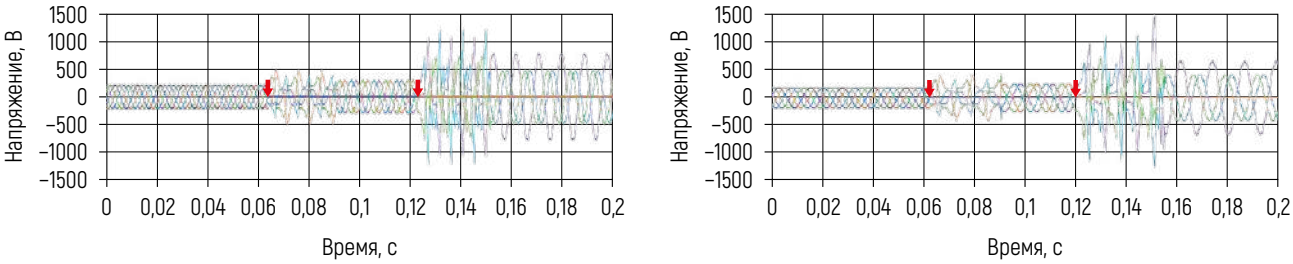


Рисунок 11 – Блок-схема подсистемы управления линейными двигателями



а) б)

Рисунок 12 – Результаты моделирования аварийных режимов работы линейных двигателей: а – ротора 1; б – ротора 2

Атмосфера и погодные условия

Модель учитывает влияние атмосферы Земли и в качестве группы входных параметров принимает информацию о движении воздушных масс непосредственно вблизи корпуса ОТС. На основе данных, полученных с датчиков статического и динамического давления, блок обработки состояния атмосферы вычисляет результирующее направление и силу воздействия на корпус со стороны атмосферы. Далее автоматически вносятся поправки в функции управления электродвигателями аэродинамических плоскостей и реактивными двигателями подсистемы стабилизации положения корпуса ОТС.

На рисунке 13 показана часть модели, рассчитывающая атмосферное давление и температуру на заданной высоте.

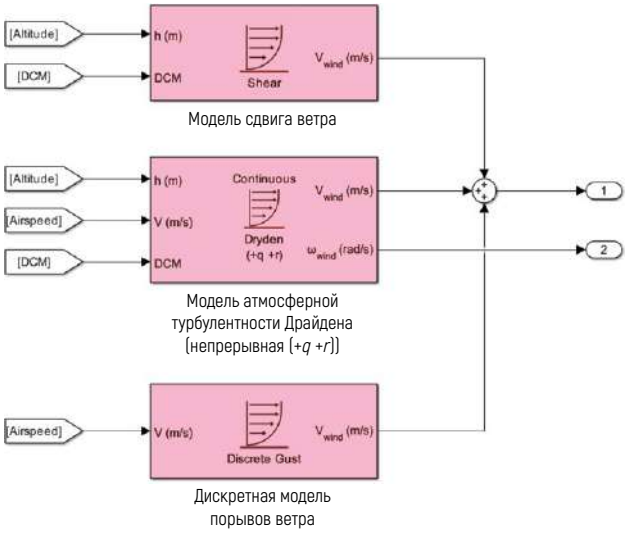


Рисунок 13 – Блок-схема подсистемы обработки метеоусловий

Расчёт траектории полёта

Направление движения поверхности планеты на экваторе примем как положительное. Скорости объектов, совпадающие с направлением вращения планеты, будут положительными, а противоположные – отрицательными. Под действием моментов импульса сил со стороны Солнца и Луны (после освобождения на эстакаде фиксирующих замков корпуса) ось вращения ОТС по мере его расширения и подъёма в космос начинает медленно изменять своё положение в пространстве относительно первоначального нормального. То есть плоскость, в которой находится ОТС, поворачивается.

Рассмотрим систему координат, образованную тремя взаимно перпендикулярными прямыми, две из которых лежат в плоскости экватора (стартовое положение ОТС) и проходят через точки на поверхности Земли со значениями долготы 0° (ось *X*) и 90° (ось *Y*). Третья прямая пересекает полюс Земли (ось *Z*). Точка *O* – начало отсчёта системы координат, совпадающее с центрами масс ОТС и Земли. Плоскость, в которой расположено ОТС, задана двумя взаимно перпендикулярными прямыми *OX'* и *OY'* (рисунок 14).

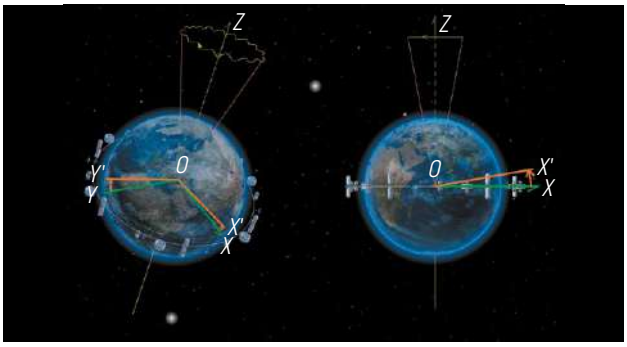


Рисунок 14 – Условные обозначения системы координат

Величина угловой скорости прецессии зависит от моментов внешних сил, собственного момента инерции относительно оси вращения и от угловой скорости собственного вращения. Скорость прецессии ОТС изменяется в процессе полёта: уменьшается по мере подъёма и растёт на спуске.

На рисунке 15 представлена блок-схема подсистемы расчёта прецессионного движения ОТС. Красным цветом выделены блоки, принимающие начальные параметры: высоту подъёма, массу полезной нагрузки, удельные массы оболочки и роторов, широту установки uWay, величины скоростей роторов и корпуса на момент отрыва от uWay, дату и время взлёта ОТС, продолжительность полёта и др. Зелёным обведена расчётная часть, результаты работы которой выводятся на осциллографы (обозначены фиолетовым цветом).

Выходные данные модели представлены в виде графиков, иллюстрирующих движение плоскости вращения ОТС после отрыва от uWay: показано движение оси *OX'* в плоскости *XOZ* и *OY'* в плоскости *YOZ*, а также изменение положения плоскости орбиты ОТС за 2 ч полёта (рисунок 16).

На рисунке 17 продемонстрирован заданный закон изменения скоростей движения роторов и корпуса ОТС на этапе подъёма на орбиту.

В качестве исходных данных модель принимает ряд параметров, приведённых в таблице 4.

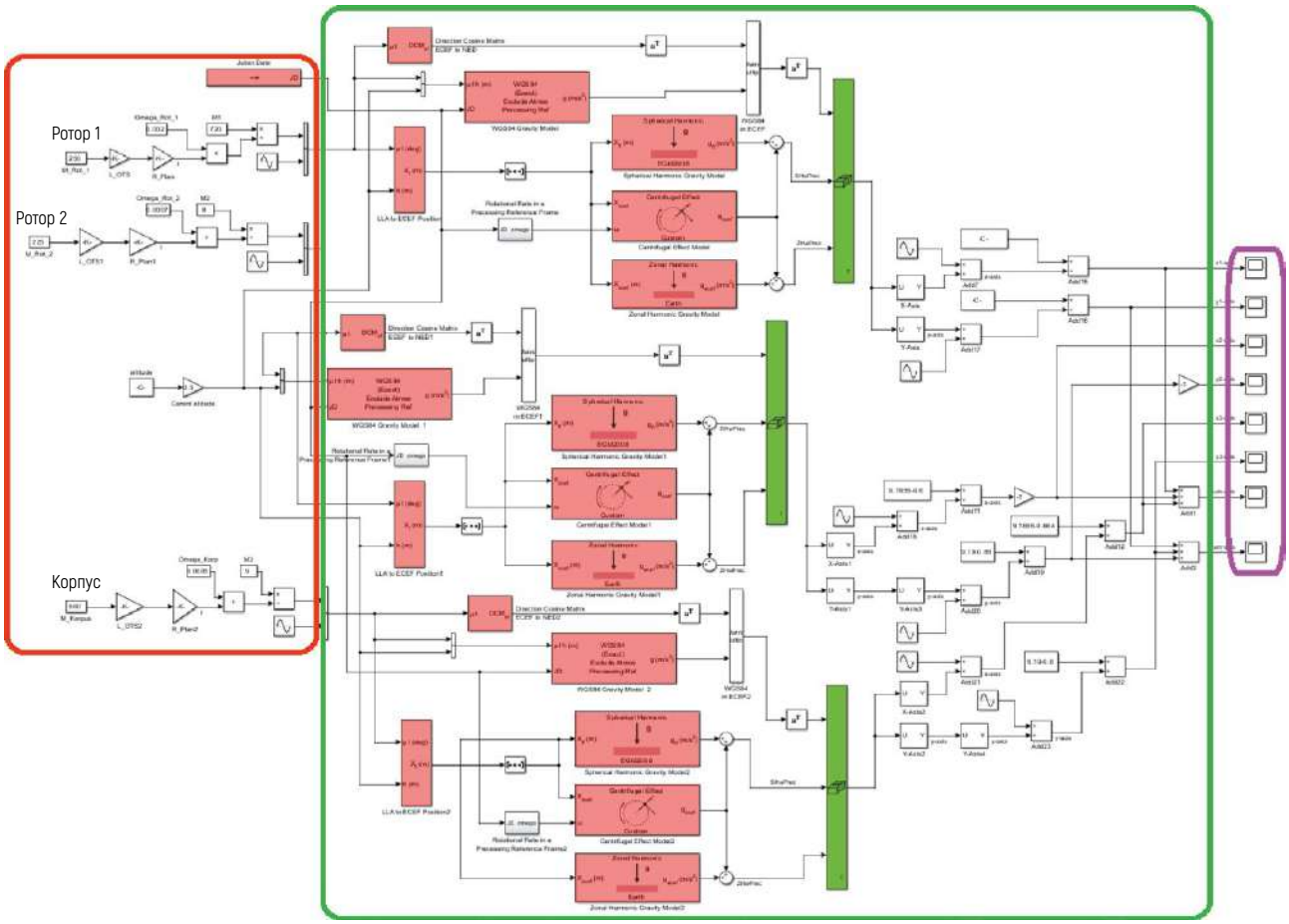


Рисунок 15 – Блок-схема подсистемы расчёта прецессионного движения ОТС

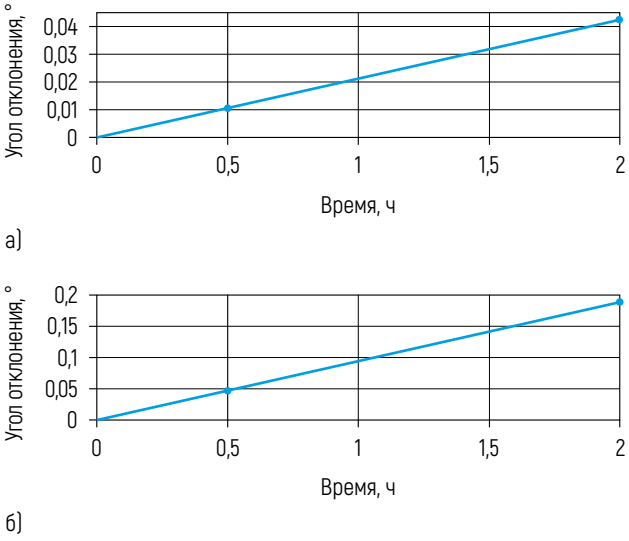


Рисунок 16 – Отклонение плоскости вращения ОТС за первые 2 ч полёта: а – в плоскости *XOZ*; б – в плоскости *YOZ*

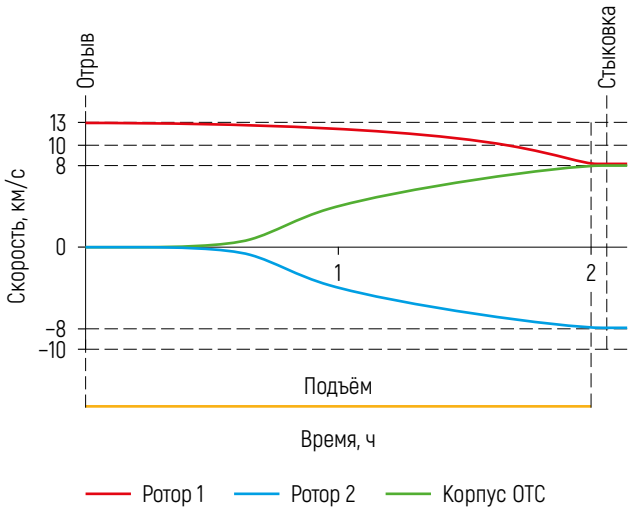


Рисунок 17 – Скорости движения роторов и корпуса ОТС относительно поверхности планеты (т. е. uWay) на этапе подъёма

Таблица 4 – Исходные данные, принимаемые моделью (вариант)

Параметр	Значение
Радиус корпуса ОТС при отрыве от uWay, км	6378,137
Высота орбиты относительно поверхности планеты, км	400
Широта установки uWay, °	0
Удельная масса ротора 1, кг/м	1200
Удельная масса ротора 2, кг/м	250
Удельная масса корпуса ОТС с полезной нагрузкой, кг/м	500
Угловая скорость вращения планеты, рад/с	$7{,}29 \times 10^{-5}$
Дата взлёта	13.09.2025
Время взлёта по Гринвичу, ч:мин:с	12:21:00
Относительная скорость движения ротора 1 при отрыве (относительно uWay), км/с	13
Относительная скорость движения ротора 2 при отрыве (относительно uWay), км/с	0
Относительная скорость движения корпуса ОТС при отрыве (относительно uWay), км/с	0
Относительная скорость движения ротора 1 при стыковке с КИО «Орбита» (относительно uWay), км/с	7,66
Относительная скорость движения ротора 2 при стыковке с КИО «Орбита» (относительно uWay), км/с	7,66
Относительная скорость движения корпуса ОТС при стыковке с КИО «Орбита» (относительно uWay), км/с	–7,66
Максимальное радиальное ускорение корпуса ОТС, м/с^2	0,03
Максимальное тангенциальное ускорение корпуса ОТС, м/с^2	2
Высота начала продольного (вращение вокруг планеты) разгона ротора 2 и корпуса ОТС, км	80

Относительная скорость ротора 1 и корпуса ОТС после набора заданной высоты достигнет 7,66 км/с; скорость ротора 2 составит такую же скорость (–7,66 км/с), только направление его движения будет противоположным направлению ротора 1 и корпуса ОТС. Разгон корпуса ОТС и ротора 2 начнётся после выхода ОТС из плотных слоёв атмосферы на высоте 80 км. Время подъёма – 2 ч.

Как видно из графиков на рисунке 16, максимальный угол отклонения плоскости ОТС составил 0,042°, или 0°2′31″, что соответствует смещению зенита на 4667 м по поверхности Земли. В таком состоянии ОТС может и не пристыковываться к КИО «Орбита», а, например, зависнуть на расстоянии 1–5 км от него. При этом пассажирские и грузовые модули будут доставлены к месту назначения с помощью маломощных реактивных двигателей.

Дальнейшее развитие модели предполагает математическое описание поведения КИО «Орбита» и Земли, что предусматривает возможность упреждающего расчёта движения плоскостей КИО «Орбита» и ОТС с целью обеспечения точного сближения для транспортировки грузов и пассажиров.

Заключение

Физическая модель полёта, представленная в ходе настоящего исследования, комплексно описывает характер движения ОТС во время подъёма на кольцевую экваториальную орбиту. Основные достижения работы заключаются в создании детализированной модели ОТС в среде MATLAB.

Получена и верифицирована модель подсистемы управления двигателями аэродинамических рулей-стабилизаторов, обеспечивающей курсовую устойчивость и контроль высоты в плотных слоях атмосферы. Модель демонстрирует эффективную отработку внешних возмущений (до 2500 Н/м).

Выстроена модель подсистемы управления пятифазными синхронными линейными двигателями роторов, отвечающими за разгон, стабилизацию скорости и переброс мощности между роторами и корпусом ОТС. Ключевым результатом является подтверждение работоспособности алгоритмов драйверов, обеспечивающих стабильное тяговое усилие при аварийных обрывах одной или двух питающих фаз.

Кроме того, модель включает подсистемы, учитывающие изменение свойств атмосферы Земли (давление, температура) в зависимости от высоты, а также принимающие во внимание широту установки uWay, что критически важно для реалистичности прогнозирования траектории и функционирования аэродинамических систем.

Модель позволила детально исследовать прецессию оси вращения ОТС под влиянием гравитационных моментов со стороны Солнца и Луны. Установлено: за время подъёма (около 2 ч) максимальное отклонение плоскости вращения ОТС составляет всего 0,042° (0°2′31″), что эквивалентно смещению зенита на 4667 м по поверхности Земли.

Полученные результаты и функционирование модели подтверждают возможность создания системы автоматического управления полётом ОТС, способной компенсировать внешние возмущения (атмосферные факторы и др.) и внутренние неисправности (обрыв фаз двигателей), гарантируя безопасность.

Дальнейшие исследования будут направлены на углублённое моделирование взаимодействия ОТС и КИО «Орбита» с учётом динамики Земли. Это необходимо для высокоточного упреждающего расчёта взаимного движения плоскостей ОТС и КИО «Орбита», что является обязательным условием для безопасной и эффективной стыковки, а также транспортировки грузов и пассажиров.

Разработанная модель полёта – существенный шаг на пути к практической реализации геокосмического транспортного комплекса на базе ОТС, важный инструмент для расчёта стартовых параметров, анализа динамики полёта, отладки алгоритмов управления, а следовательно, для обеспечения безопасности и надёжности будущих автоматизированных полётов ОТС.

Список основных источников

1. *Юницкий, А.Э. В космос... на колесе / А.Э. Юницкий // Техника – молодёжи. – 1982. – N° 6. – С. 34–36.*
2. *Юницкий, А.Э. Программа «ЭкоМир» / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 24–77.*
3. *Казусенок, Е.А. Земная атмосфера и её строение / Е.А. Казусенок // Инновации в технике и технологии дорожно-транспортного комплекса: сб. докл. респ. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, 11–12 апр. 2013 г., Минск: в 6 ч. / Белорус. нац. техн. ун-т; науч. рук. И.И. Леонович. – Минск, 2013. – Ч. 3. – URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/16440/Zemnaya_atmosfera.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата обращения: 12.05.2025).*
4. *Движение планет: расчёт и визуализация в среде Mathcad или Часы Кеплера / В.Ф. Очков, Е.П. Богомолова, Д.А. Иванов, К. Писачич // Cloud of Science. – 2015. – Т. 2, N° 2. – С. 177–215.*
5. *Баяндина, Т.А. Динамика полёта самолёта. Расчёт траекторий и лётных характеристик: учеб. пособие / Т.А. Баяндина. – Самара: Изд. Самар. ун-та, 2023. – 152 с.: ил.*
6. *Проектирование коррекции траектории космического аппарата СПЕКТР-Р при наличии погружений его в сферу влияния Луны / Г.С. Заславский, М.В. Захваткин, Н.С. Кардашев [и др.] // Космические исследования. – 2017. – Т. 55, N° 4. – С. 305–320.*
7. *Баранов, А.А. Разработка методов расчёта параметров манёвров космических аппаратов в окрестностях круговой орбиты: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.02.01 / Баранов Андрей Анатольевич; Ин-т приклад. математики им. М.В. Келдыша РАН. – М., 2019. – 40 с.*
8. *Гриценко, П.А. Управление движением квадрокоптера по заранее заданной траектории / П.А. Гриценко, А.С. Кремлев, Г.М. Шмигельский // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – N° 4 (86). – С. 22–25.*
9. *Иванов, В.М. Управление космическим аппаратом баллистического типа при спуске с орбиты в заданную область поверхности Земли / В.М. Иванов, В.И. Лобачев, Н.Л. Соколов // Фундаментальные исследования. – 2014. – N° 8. – С. 577–582.*
10. *Пасынок, С.Л. Методы и средства определения параметров вращения Земли / С.Л. Пасынок // Альманах современной метрологии. – 2016. – N° 8. – С. 269–323.*
11. *Перепелкин, В.В. Динамическая модель колебаний земного полюса с учётом прецессии лунной орбиты / В.В. Перепелкин, Д.С. Румянцев, А.С. Филиппова // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». – 2025. – Т. 29, N° 4. – С. 657–670.*
12. *Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск: Парадокс, 2019. – 240 с.*

13. *Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы III междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 12 сент. 2020 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск: СтройМедиаПроект, 2021. – 516 с.*
14. *Юницкий, А.Э. Система управления движением линейных роторов общепланетарного транспортного средства / А.Э. Юницкий, В.Л. Лукша // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 110–117.*

УДК 629.78:629.7.02

Стабилизация общепланетарного транспортного средства относительно взлётно-посадочной эстакады

А.Э. Юницкий[1, 2]
доктор философии транспорта

Ф.С. Карпей[2]

А.А. Щербич[2]

[1] ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

[2] ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

При взлёте и посадке общепланетарного транспортного средства (ОТС) не исключена проблема его смещения вдоль земной оси, т. е. в направлении, поперечном плоскости ОТС, в том числе относительно взлётно-посадочной эстакады, под воздействием внешних сил, таких как ветер, экваториальные течения и др.

Цель работы заключается в проектировании аэродинамической системы стабилизации, позволяющей позиционировать ОТС относительно плоскости экватора при взлёте и посадке, а также при необходимости осуществлять боковой манёвр в сторону.

Рассмотрены основные факторы, влияющие на дестабилизацию ОТС, и описаны требования, предъявляемые к конструктиву системы стабилизации. Предложен вариант исполнения и принцип функционирования данной системы с использованием аэродинамических сил, рассчитана её аэродинамическая эффективность и прочность.

Представленный вариант системы стабилизации способен нивелировать внешние дестабилизирующие нагрузки, а также позволяет ОТС выполнять боковой манёвр, что делает возможным размещение эстакады не только в плоскости экватора, но и параллельно ему на расстоянии в десятки и даже сотни километров.

Ключевые слова:
аэродинамика корпуса, компенсация боковых нагрузок, общепланетарное транспортное средство (ОТС), система стабилизации, стабилизация положения.

UDC 629.78:629.7.02

Stabilization of General Planetary Vehicle Relative to Takeoff and Landing Overpass

A. Unitsky[1, 2]
Dr. of Philosophy
in Information Technologies
(Transport)

F. Karpey[2]

A. Shcherbich[2]

[1] Astroengineering Technologies LLC,
Minsk, Belarus

[2] Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

During takeoff and landing of the General Planetary Vehicle (GPV), there is a possibility of its displacement along the Earth's axis – that is, in a direction transverse to the GPV plane, including relative to the overpass – under the influence of external forces such as wind, equatorial currents, etc.

The aim of this work is to design an aerodynamic stabilization system that enables the GPV to maintain its position relative to the equatorial plane during takeoff and landing, as well as to perform lateral maneuvers to the side when necessary.

The main factors affecting the destabilization of the GPV are examined, and the requirements for the design of the stabilization system are described. A variant of the design and principle of operation of this system using aerodynamic forces is proposed, and its aerodynamic efficiency and strength are calculated.

The presented version of the stabilization system is capable of neutralizing external destabilizing loads and also allows the GPV to perform lateral maneuvers, which makes it possible to place the overpass not only in the equatorial plane, but also parallel to it at distances of tens or even hundreds of kilometers.

Keywords:
body aerodynamics,
General Planetary Vehicle (GPV),
lateral load compensation,
position stabilization,
stabilization system.

Введение

Ключевые моменты процессов подъёма на орбиту и спуска общепланетарного транспортного средства (ОТС) подробно описаны его разработчиком А.Э. Юницким [1–3]. Подъём происходит за счёт центробежной силы, возникающей при движении ленточных маховиков, размещённых внутри вакуумных каналов, при этом ОТС увеличивается в диаметре и по длине на 1,57 % за каждые 100 км набора высоты [2].

Этапы подъёма и посадки следует относить к переходным процессам. Вместе с тем кроме внутренних сил (центробежные силы) на ОТС и его взлётно-посадочную эстакаду действуют внешние дестабилизирующие силы – поперечный ветер, а на морских участках – гидродинамические нагрузки от поперечных течений, стремящихся сместить из плоскости экватора плавучую эстакаду, заякоренную на дне (средняя глубина океанов на экваторе – около 4 км).

В связи с вышеизложенным цель работы заключается в проектировании системы стабилизации, позволяющей позиционировать ОТС относительно плоскости экватора при взлёте и посадке, в том числе при смещении морской части эстакады в сторону от экватора под воздействием поперечных ветровых сил и морских течений. Это также даст возможность при необходимости размещать взлётно-посадочную эстакаду не только в плоскости экватора, но и параллельно ему на расстоянии до 1000 км.

Анализ факторов, влияющих на дестабилизацию положения ОТС

Для проектирования системы стабилизации и понимания принципов её работы необходимо рассмотреть основные факторы, способные привести к нарушению устойчивости положения ОТС относительно плоскости экватора:

- турбулентность и внезапные порывы воздуха. Данные явления могут вызвать кратковременные синусоидальные отклонения в поперечном направлении относительно вертикального подъёма протяжённого (длиной в сотни и тысячи километров) участка ОТС при прохождении плотных слоёв атмосферы [4];
- ветер с боковой составляющей. В плотных слоях атмосферы, на высотах 15–20 км, скорость ветра достигает 30–35 м/с и выше [5];
- локальные обледенения (на высотах более 2500 м). Такие образования нарушают обтекание поверхности корпуса воздушными потоками, изменяют его форму и массу, ухудшая аэродинамические характеристики [4];
- смещение центра тяжести. Отклонения центра масс ОТС относительно центра масс Земли, обусловленные неравномерной загрузкой (пассажиры, грузы) по его длине, способны вызвать отклонения от оси вращения планеты и, соответственно, ОТС (их центры масс и оси вращения должны всегда совпадать);
- внешние моменты сил Солнца и Луны, влияющие на ОТС со стороны их гравитационных полей. Гравитационное воздействие Солнца и Луны не может сместить центр масс ОТС относительно центра масс Земли, как и не способны эти силы отклонить от вертикали любой маятник (ОТС является гигантским маятником) – он всегда будет в вертикальном устойчивом положении (в состоянии минимума потенциальной энергии).

Наибольшее внимание в контексте поставленной задачи следует уделить боковому маневрированию, поскольку именно оно необходимо для точной посадки ОТС на взлётно-посадочную эстакаду, независимо от её нахождения – на экваторе или со смещением относительно него (локально или целиком).

Исходя из вышеперечисленного, целесообразно иметь систему, способную противостоять описанным факторам, а также иным, не вошедшим в выборку.

На графиках рисунка 1 линии красного и чёрного цвета показывают максимальные скорости, измеренные двумя методами [5]. Для нашего исследования наибольший интерес представляют изменения значений максимальных скоростей ветра в зависимости от высоты. Данные графиков наглядно демонстрируют, что на высотах 10–20 км, где скорость воздушных потоков достигает 35 м/с, могут сформироваться негативные условия для вертикального подъёма локального (длиной в сотни и тысячи километров) участка ОТС, имеющего общую длину более 40 000 км. Этого будет достаточно, чтобы оказать дестабилизирующий эффект при подъёме на орбиту такого протяжённого и гибкого самонесущего летательного аппарата.

Кроме того, графики иллюстрируют, что характеристики ветровых потоков не постоянны во времени и наблюдается хаотичное изменение их направления и скорости вдоль линии экватора в зависимости от сезонности. Вместе с тем ни в один из временных интервалов скорость более 35 м/с не зафиксирована, следовательно, её можно считать максимальной.

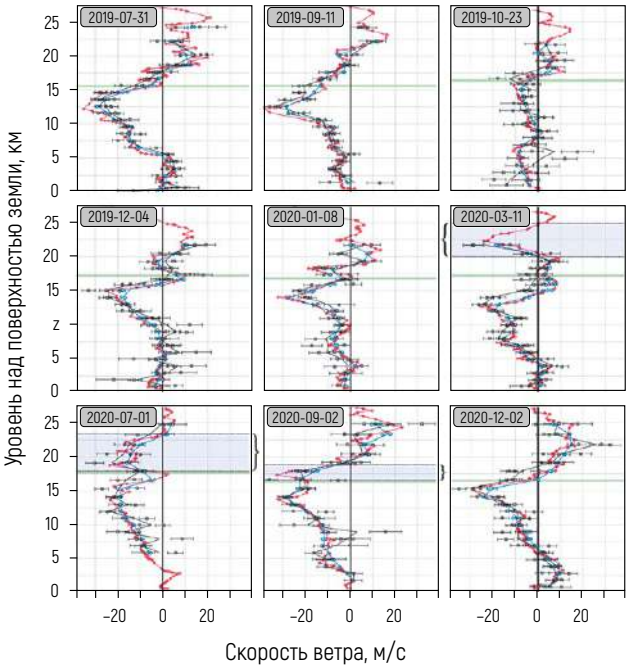


Рисунок 1 – Зависимость скорости ветра на экваторе от высоты над уровнем моря в различные временные интервалы

Формирование требований к конструктиву системы стабилизации положения ОТС

В основу работы системы стабилизации включены требования, которые в первую очередь должны соответствовать следующим критериям:

• минимизация дополнительной массы. Линейная масса снаряжённого ОТС с поперечным диаметром корпуса около 2 м составит примерно 1000 кг/м, из них 250 кг/м (25 % от общей массы) придётся на полезную нагрузку (пассажиры и грузы). Линейная масса системы стабилизации не должна превышать 10 кг/м (не более 1 % от общей массы), иначе снизится грузоподъёмность системы на те же 10 кг/м (4 % от общей грузоподъёмности);

• повышение управляемости и быстродействие. Система стабилизации должна позволять гибко и своевременно регулировать положение стабилизирующих элементов, тем самым корректировать положение ОТС по горизонтали и вертикали, как общее, так и локальное;

• достаточная прочность и оптимальная жёсткость, обусловленные величиной стабилизирующих усилий, находящихся в пределах 10 % от линейного веса участка ОТС, что составит значение до 1000 Н/м. При минимизации массы системы стабилизации следует сохранить жёсткость её элементов, обеспечивающих прочность;

• габаритные размеры и форма стабилизирующих элементов. Данные параметры не должны препятствовать штатному расположению ОТС на взлётно-посадочной эстакаде и вызывать излишнее аэродинамическое сопротивление на атмосферном участке подъёма и спуска ОТС;

• совместимость с аэродинамикой корпуса. Корпус ОТС имеет цилиндрическую форму, обеспечивающую оптимальный коэффициент аэродинамического сопротивления для своей траектории полёта. Элементы стабилизации не должны существенно ухудшать аэродинамику [6];

• адаптивность к внешним факторам (перепады давления, обледенение), в том числе к космическим воздействиям – солнечному излучению и солнечному ветру, космической радиации, ударам микрометеоритов и космического мусора, влиянию притяжения Луны, температурным колебаниям и др. К примеру, Международная космическая станция испытывает перепад температур от 200 °С (на солнце) до –200 °С (в тени) [7];

• минимизация энергопотребления. Учитывая, что система должна иметь высокую управляемость и быстродействие, она предполагает электрическое питание для полноценного функционирования и низкую мощность запитки (не более 10 Вт на погонный метр ОТС, или 400 000 кВт для всей системы).

Вариант предлагаемой системы стабилизации

На основании анализа факторов, влияющих на работу системы стабилизации, и требований, предъявляемых к ней, в качестве базового варианта предложена система в виде динамических закрылков (крыльев) длиной *L* и шириной *h*. На рисунке 2 представлена схема, при которой боковое положение корпуса ОТС будет корректироваться размещёнными на нём регулируемыми секторами – закрылками – за счёт аэродинамических сил, возникающих при движении вдоль экватора.

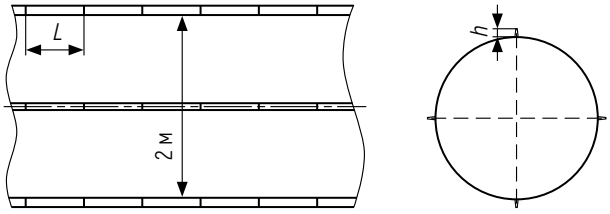


Рисунок 2 – Вариант исполнения системы стабилизации

Конструктивное исполнение системы стабилизации

Для функционирования системы стабилизации требуется обеспечить управляемый поворот каждого закрылка относительно точки его крепления. В качестве варианта исполнения может быть использована конструкция, представленная на рисунке 3.

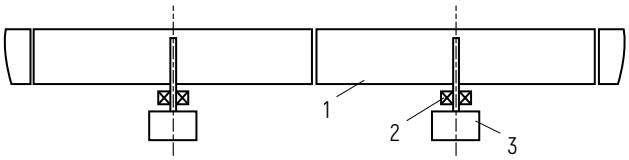


Рисунок 3 – Вариант исполнения системы стабилизации:
1 – закрылок; 2 – узел поворотной оси; 3 – сервопривод

При необходимости стабилизации бокового положения корпуса система управления ОТС определяет величину бокового возмущения и вычисляет нужный угол поворота закрылков. После этого поступает соответствующая команда на шаговый электромотор. Сервопривод передаёт крутящий момент на вал закрылка, осуществляя его поворот на требуемый угол с последующей фиксацией положения вала.

Оценка эффективности системы стабилизации

На первом этапе рассчитывалась аэродинамическая сила, обеспечиваемая парой закрылков в процессе движения корпуса ОТС вдоль линии экватора, способная компенсировать, например, боковую составляющую ветра или осуществлять маневрирование относительно взлётно-посадочной эстакады. В таком случае будут задействованы верхние и нижние закрылки. В качестве исходных данных для расчёта приняты размеры закрылка (L = 500 мм и h = 100 мм), скорость линейного движения корпуса ОТС и угол поворота закрылков. Закрылки образуют сплошное крыло, идущее вдоль корпуса ОТС. Возможен также вариант установки отдельных поворотных крыльев на расстоянии друг от друга (этот конструктив в настоящей работе не исследуется).

В результате математического моделирования получены картины распределения статического давления на поверхности закрылков (рисунок 4), а также построены графики зависимости компенсирующей силы от угла поворота пары закрылков и скорости набегающего потока (скорости линейного движения ОТС) (рисунок 5).

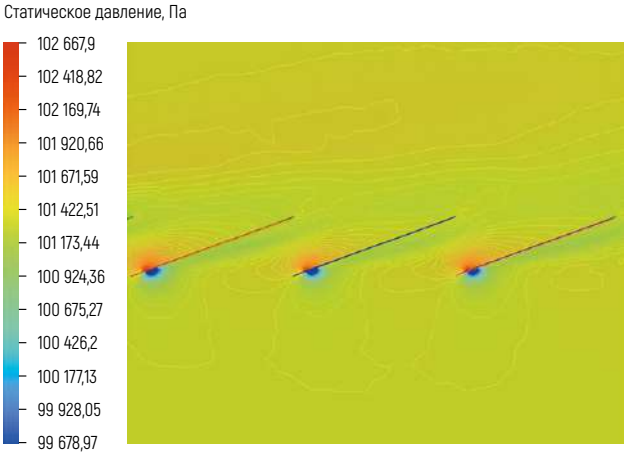


Рисунок 4 – Распределение статического давления в сечении закрылков при скорости лобового потока 55,5 м/с (200 км/ч)

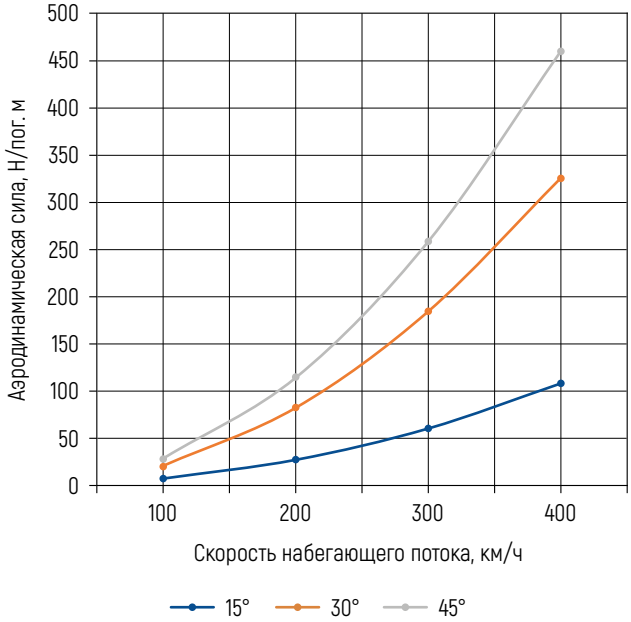


Рисунок 5 – Зависимость бокового усилия, создаваемого встречным воздушным потоком, от угла поворота верхних и нижних закрылков и скорости набегающего потока

Максимальное боковое усилие, создаваемое вертикальными закрылками шириной 100 мм, может достигать 460 Н/пог. м. При воздействии такой равномерно распределённой боковой силы ОТС будет смещаться эквидистантно экватору на расстояние до 300 км (при отсутствии бокового ветра).

На втором этапе рассчитывалась сила компенсации гироскопического момента, необходимая для позиционирования ОТС относительно плоскости экватора:

$$F_M = \frac{M}{l}, \text{ Н/пог. м},$$

где M – гироскопический момент ОТС, Н · м;

l – рычаг приложения силы, в данном случае равен радиусу ОТС (≈ 6,38 × 10^6 м).

Гироскопический момент можно найти по формуле:

$$M = I\omega\Omega, \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где I – момент инерции, кг · м^2;

ω – угловая скорость вращения, рад/с;

Ω – угловая скорость прецессии, рад/с.

$$I = mr^2 = 4 \times 10^{10}(6{,}38 \times 10^6)^2 = 1{,}63 \times 10^{24} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где m – масса ОТС, равная 4 × 10^{10} кг;

r – радиус ОТС, равный 6,38 × 10^6 м.

$$\omega = \frac{V}{r} = \frac{10\,000}{6{,}38 \times 10^6} = 0{,}00157 \text{ рад/с},$$

где V – линейная скорость движения маховика, равная 10 000 м/с.

$$\Omega = \frac{\alpha}{t}, \text{ рад/с},$$

где под угловой скоростью прецессии Ω подразумевается скорость перемещения оси вращения ОТС на угол α за время t.

Угол α наклона плоскости ОТС относительно экваториальной плоскости планеты обусловлен внешними моментами, вызванными гравитационными силами Солнца и Луны, воздействующими на ОТС. Следовательно, гироскопический момент M и, соответственно, сила F_M будут зависеть от требуемого угла α и времени t (рисунок 6). Для упрощения восприятия графика угол α переведён из радианов в градусы.

К примеру, при угле наклона α = 0,1 максимальное отдаление участков ОТС от плоскости экватора будет находиться на расстоянии L = 6371 × 0,1 × π/180 ≈ 11 км (рисунок 7).

При формировании закрылками максимального усилия 460 Н/пог. м в условиях стандартного атмосферного давления и при скорости корпуса (скорость набегающего потока) 400 км/ч можно стабилизировать ОТС за временной интервал около 400 с.

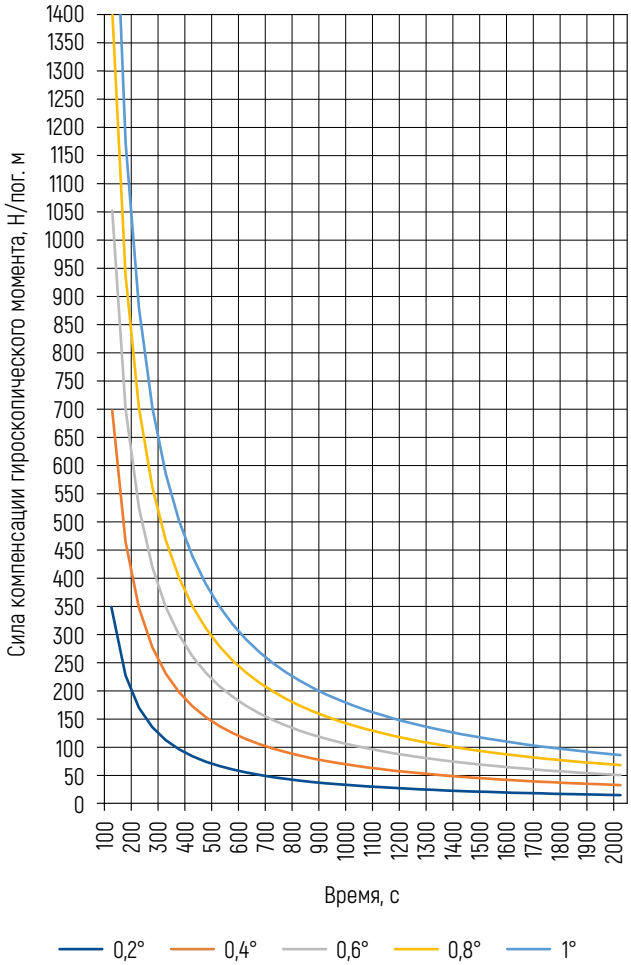


Рисунок 6 – Зависимость силы компенсации гироскопического момента от угла наклона плоскости ОТС относительно экваториальной плоскости планеты и времени на стабилизацию

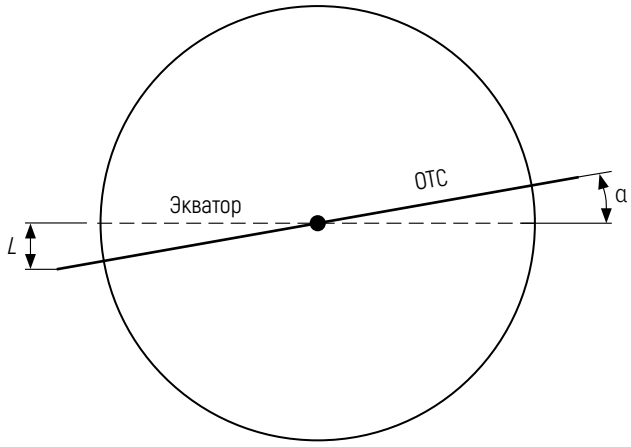


Рисунок 7 – Вариант отклонения ОТС от линии экватора

Следует отметить, что аналогичное усилие будет и на закрылках, расположенных по горизонтали, что позволит позиционировать ОТС вертикально относительно крупных синусоидальных неровностей рельефа местности (и продольного профиля взлётно-посадочной эстакады).

Возможность использования системы стабилизации в качестве аэродинамического тормоза

Помимо боковой стабилизации предложенная конструкция способна осуществлять функцию аэродинамического тормоза ОТС при посадке на эстакаду. На рисунке 8 показан график зависимости силы торможения от угла поворота закрылков и скорости движения корпуса ОТС.

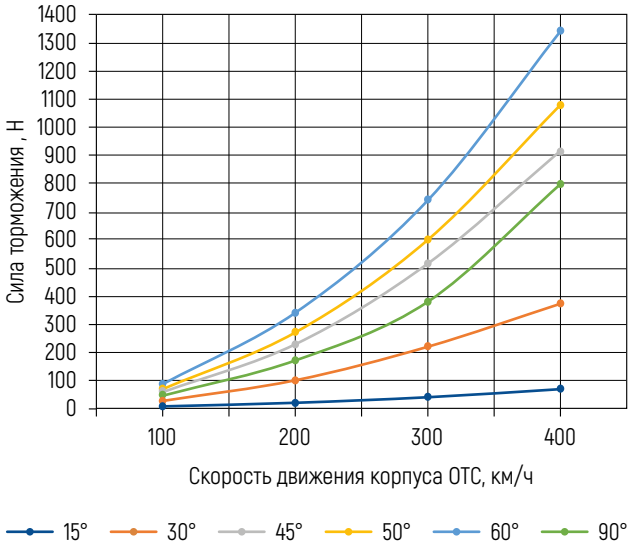


Рисунок 8 – Зависимость силы торможения, создаваемой встречным воздушным потоком на погонный метр ОТС, от угла поворота всех закрылков и скорости движения корпуса ОТС

График наглядно иллюстрирует, что самая большая сила торможения, создаваемая закрылками на погонный метр ОТС, формируется при угле поворота 60°. Закрылки, установленные под углом 90°, не обеспечивают должной площади контакта с воздушным потоком, поскольку находятся в аэродинамической тени друг друга (рисунок 9). Максимальное значение силы торможения на погонный метр ОТС от вертикальных и горизонтальных закрылков составило 1340 Н, или 335 Н на один закрылок.

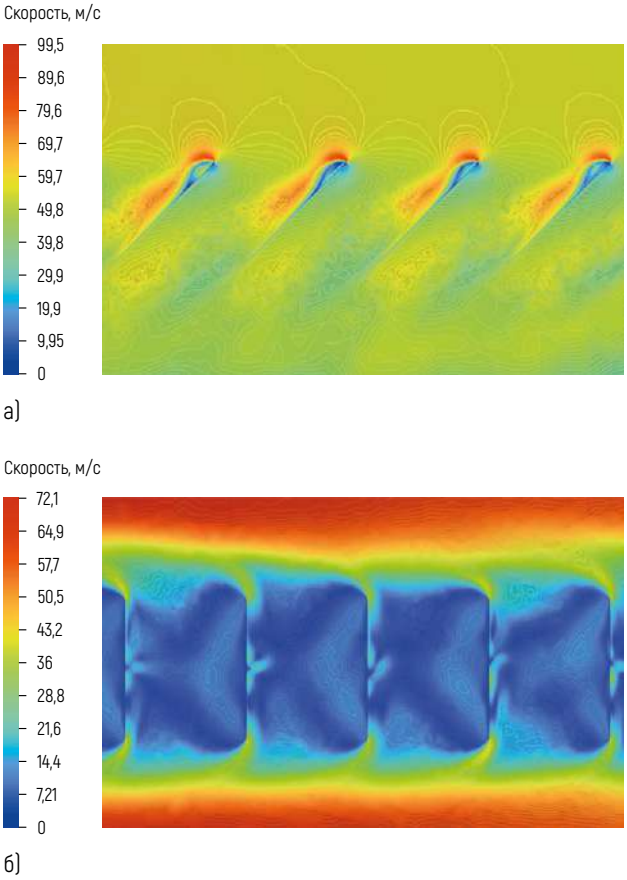


Рисунок 9 – Поля распределения скоростей:
а – при угле поворота закрылков 50°;
б – при угле поворота закрылков 90°

Таким образом, тормозящее аэродинамическое усилие при угле поворота закрылков 60° достигнет 1340 Н/пог. м, что обеспечит максимальное усилие торможения на всё ОТС $5{,}2 \times 10^{10}$ Н (5,3 млн тонн) при скорости движения 400 км/ч, $2{,}96 \times 10^{10}$ Н (3 млн тонн) при 300 км/ч и $3{,}44 \times 10^{9}$ Н (350 000 тонн) при 100 км/ч.

Расчёт прочностных характеристик закрылков

Для анализа физической возможности использования предложенной конструкции проведены прочностные расчёты, где оценивался единичный элемент (закрылок) прямоугольной формы размером 100 × 500 мм (рисунок 10). В качестве материала выбран широко применяемый в авиастроении алюминиевый сплав Д16Т, сочетающий в себе прочность с условным пределом текучести $\sigma_{0,2}$ = 280 МПа и относительно низкую плотность 2770 кг/м^3.

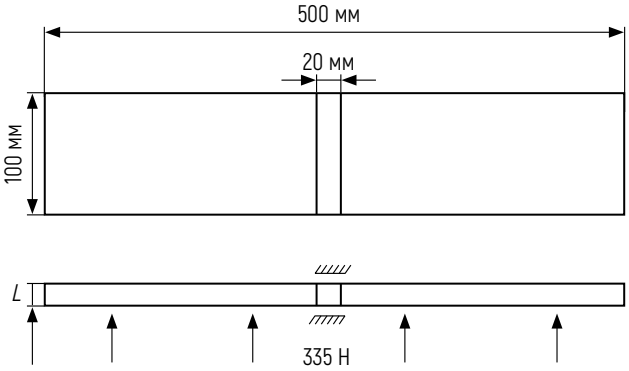


Рисунок 10 – Граничные условия прочностного расчёта единичного закрылка

По результатам прочностных параметрических расчётов для материала Д16Т получено оптимальное значение толщины *L* пластины – 4 мм. Максимальные напряжения в этом случае составили 75 МПа (рисунок 11), а допустимая цикличность нагрузок при данных напряжениях – около 300 000 циклов.

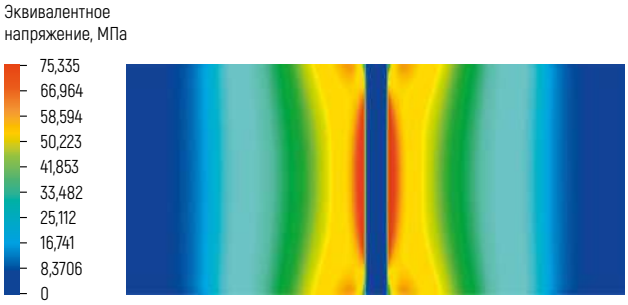


Рисунок 11 – Распределение эквивалентных напряжений в закрылке толщиной 4 мм

Если учесть, что действующая сила 335 Н – предельно возможная величина, то прочностные показатели элементов стабилизации отвечают требованиям работоспособности. При этом масса закрылков без системы управления составляет 4 кг/пог. м, а при их переменной толщине по длине и высоте – 2 кг/пог. м.

Применение аэродинамических закрылков ОТС

Применение аэродинамических закрылков ОТС имеет особенности на каждом этапе полёта.

Перед взлётом

ОТС перед взлётом закреплено на эстакаде, в том числе на её плавучей части в океане, поэтому летательный аппарат будет находиться по центру (по продольной оси) эстакады независимо от скорости и направления ветра и морских течений. ОТС здесь не нуждается в корректировке положения и стабилизации. Кроме того, ленточные маховики, имеющие массу миллионы тонн и движущиеся со скоростью около 10 км/с, выполняют роль гигантских гироскопов, которые стабилизируют кольцевую форму ОТС, охватывающего планету. На участках искривления плавучей эстакады под действием морских течений и ветра они будут преобразовывать локальные искривления в плавные синусоидальные с радиусами кривизны, превышающими 1000 км.

При взлёте

При взлёте ОТС отрывается от эстакады и становится самонесущим кольцевым гироскопом ленточного типа диаметром 12 756 км с центром масс, совмещённым с центром масс планеты. Такое положение ОТС устойчиво, и относительно центра масс Земли данная конструкция по сути является маятником, который вывести из равновесия может только боковая ветровая сила. Например, при общей массе ОТС 40 млн тонн равномерно распределённое по всей длине боковое усилие в 400 000 тонн (100 Н/пог. м) способно переместить этот общепланетарный гироскоп на величину, равную 1 : 40 000 000 / 400 000 = 1 : 100 от земного радиуса, т. е. на 63,8 км эквидистантно экватору. Однако даже подобное теоретически возможное существенное отклонение от экватора не представляет опасности для ОТС на этапе взлёта. Это обусловлено тем, что при прекращении действия дестабилизирующей боковой силы, например ветровой, при выходе из плотных слоёв атмосферы (на высоте более 30 км) ОТС, как и любой другой маятник, возвращается в устойчивое положение, в данном случае – в плоскость экватора, но уже на орбите. Следовательно, на этапе взлёта нет необходимости в аэродинамической стабилизации ОТС с помощью закрылков, поэтому они выключены.

На орбите

На орбите, в вакууме, значительные дестабилизирующие усилия отсутствуют, кроме гравитационного влияния близко расположенной Луны (Солнце размещено относительно далеко) и солнечного ветра, которые не способны вывести ОТС из устойчивого равновесия с нахождением его центра масс в центре масс планеты.

При спуске с орбиты

При вхождении в плотные слои атмосферы на идеальную кольцевую форму ОТС начнёт действовать боковой ветер, причём зонально, на участках длиной не более 100 км. Такие усилия будут стремиться локально изогнуть ОТС в виде синусоидальной линии. Это не представит какой-либо опасности, поскольку при прекращении ветра и изменении его направления из-за снижения высоты полёта и перемещения участка корпуса в другую локацию (корпус ОТС на этапе спуска может иметь диапазон скоростей относительно поверхности земли/воды от 100 до 1000 км/ч в зависимости от принятых (штатных) скоростных режимов) корпус ОТС выпрямится за счёт динамического стабилизирующего воздействия ленточных маховиков, движущихся с космическими скоростями.

При посадке

При посадке потребуется коррекция положения ОТС относительно эстакады. Во-первых, корпус летательного аппарата может быть локально изогнут (на десятки и даже сотни метров) под действием бокового ветра. Во-вторых, эстакада на морских участках может быть локально сдвинута относительно экватора ветром и течениями. Использование аэродинамических закрылков на данном этапе оправдано, так как позволит откорректировать линейно-кольцевую форму корпуса ОТС эквидистантно линейно-кольцевой форме эстакады.

При боковом манёвре

При воздействии равномерно распределённой боковой силы ОТС будет смещаться эквидистантно экватору, например на 63,8 км, если эта сила составит 1/100 веса летательного аппарата, или 100 Н/пог. м, при его линейной массе, равной 1000 кг/м. Если аэродинамические закрылки обеспечат такие боковые усилия на всей длине корпуса ОТС, то взлётно-посадочная эстакада может быть размещена эквидистантно экватору на расстоянии, пропорциональном этой силе, вплоть до сотен километров. В данном случае ОТС должно иметь шасси и садиться на определённой скорости, как самолёт, иначе самонесущий летательный аппарат длиной более 40 000 км может приземлиться мимо эстакады.

Заключение

В работе проведена комплексная оценка факторов, влияющих на дестабилизацию положения ОТС относительно плоскости экватора. Предложен вариант системы стабилизации, способной противостоять негативному воздействию бокового ветра и морских течений не только на корпус ОТС, но и на его плавучую взлётно-посадочную эстакаду, размещённую в океане. Аэродинамический стабилизатор в виде закрылков (крыльев) может также осуществлять функцию аэродинамического тормоза при посадке. Показан вариант исполнения такой системы, установлены массогабаритные параметры и дана их численная оценка. Представлены математические расчёты по определению прочностных и циклических характеристик.

К преимуществам предложенного конструктива закрылков относятся их сравнительно низкая материалоёмкость, составляющая 2–4 кг на погонный метр ОТС, и невысокое энергопотребление, необходимое для регулирования их угла поворота (в зависимости от внешних факторов). Даже если выйдут из строя отдельные закрылки на локальных участках, обеспечивается возможность штатного позиционирования корпуса.

Кроме того, показана реализуемость бокового манёвра ОТС при посадке на эстакаду, размещённую не в плоскости экватора, а эквидистантно ему, на расстоянии в десятки и даже сотни километров.

К потенциальным недостаткам системы можно отнести способность регулировать положение ОТС только при его движении с окружной скоростью свыше 100 км/ч, однако эти скоростные режимы легко осуществимы при спуске с орбиты, где корпус имеет окружную скорость 7,67 км/с на высоте 400 км.

Список основных источников

1. *Общепланетарное транспортное средство и космическое ожерелье «Орбита» как альтернатива ракетному освоению околоземного пространства / А.Э. Юницкий, С.А. Пронкевич, С.В. Артюшевский, В.Л. Лукша // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2021. – Т. 22, № 4. – С. 364–372.*
2. *Юницкий, А.Э. Система управления движением линейных роторов общепланетарного транспортного средства / А.Э. Юницкий, В.Л. Лукша // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 110–116.*

3. *Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А.Э. Юницкий. – Силакрогс: ПНБ Принт, 2019. – 576 с.*
4. *Aykan, R. Aircraft Icing Identification Based on Neural Networks Applied to F-16 Fighter / R. Aykan, F. Caliskan, C. Hajiyev // Automatic Systems for Building the Infrastructure in Developing Countries: Proceedings Volume from the IFAC Workshop, Bansko, 3–5 Oct. 2004. – URL: https://www.researchgate.net/publication/311922182_Aircraft_Icing_Identification_based_on_Neural_Networks_Applied_to_F-16_Fighter (date of access: 25.06.2025).*
5. *Aeolus Wind Lidar Observations of the 2019/2020 Quasi-Biennial Oscillation Disruption with Comparison to Radiosondes and Reanalysis / T.P. Banyard, C.J. Wright, S.M. Osprey [et al.] // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2024. – Vol. 24, iss. 4. – P. 2465–2490.*
6. *Аронин, Г.С. Практическая аэродинамика / Г.С. Аронин. – М.: Воениздат, 1962. – 384 с.*
7. *Galuppi, L. Thermal Analysis of Space Station Windows in Low Earth Orbit: Intermaterial Comparison of Fused Silica and Acrylic Glass / L. Galuppi, G. Royer-Carfagni // Aerotecnica Missili & Spazio. – 2025. – Vol. 104. – P. 535–554.*

УДК 533.68+629.7

Аэродинамическое влияние сетчатых ограждающих конструкций в эстакаде общепланетарного транспортного средства

А.Э. Юницкий[1,2]
доктор философии транспорта

И.И. Дьяков[2]

А.А. Щербич[2]

[1] ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

[2] ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

Представлено комплексное исследование аэродинамических процессов, возникающих при движении транспортных средств – юнимобилей, в тоннелях с сетчатыми ограждающими конструкциями в составе геокосмического транспортного комплекса общепланетарного транспортного средства (ОТС). Основное внимание уделено созданию и применению многоступенчатой методики моделирования, направленной на повышение точности расчётов без существенного увеличения вычислительных затрат.

Цель работы – исследование влияния коэффициента пропускной способности сетчатых ограждающих конструкций на аэродинамическое сопротивление и энергетические потери при движении высокоскоростного подвижного состава в тоннеле.

Проведён сравнительный анализ результатов, полученных в рамках стационарной и нестационарной постановок. Обнаружено, что при определённых условиях стационарное моделирование обеспечивает высокую степень схожести с нестационарными расчётами. Исследовано влияние степени перфорации стенок на структуру течения воздуха, распределение давления, аэродинамическое сопротивление и энергетические потери транспортного средства. Выявлены характерные режимы течения воздуха.

Представленные данные численного моделирования могут применяться при проектировании и модернизации транспортных тоннелей для снижения энергетических затрат, увеличения пропускной способности и обеспечения устойчивости воздушных потоков вблизи движущихся юнимобилей. Это особенно важно в высокоскоростных системах (скорость более 100 м/с), где мощность привода и энергоэффективность подвижного состава на 90 % и выше определяется именно аэродинамикой, в том числе при движении в тоннеле (сплошном или сетчатом). Именно такой транспорт uST планируется использовать для перемещения пассажиров и грузов вдоль взлётно-посадочной эстакады ОТС с целью равномерной загрузки гигантского самонесущего летательного аппарата протяжённостью более 40 000 км.

Ключевые слова:
аэродинамическое сопротивление, коэффициент пропускной способности, общепланетарное транспортное средство (ОТС), потери давления, сетчатые ограждающие конструкции, численное моделирование, uST.

UDC 533.68+629.7

Aerodynamic Influence of Mesh Protective Structures of General Planetary Vehicle Overpass

A. Unitsky[1, 2]
Dr. of Philosophy
in Information Technologies
(Transport)

I. Dzyakau[2]

A. Shcherbich[2]

[1] Astroengineering Technologies LLC,
Minsk, Belarus

[2] Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

The paper presents a comprehensive study of aerodynamic processes occurring during the movement of vehicles (uPods) through tunnels equipped with mesh protective structures within the framework of the General Planetary Vehicle (GPV) geocosmic transport complex. Particular attention is devoted to the development and application of a multistage modeling methodology designed to improve the accuracy of calculations without significantly increasing computational costs.

The study aims to assess the effect of the throughput coefficient of mesh protective structures on aerodynamic drag and energy losses during the movement of high-speed rolling stock in a tunnel.

A comparative analysis of the results obtained in stationary and nonstationary settings was conducted. It was found that under certain conditions, stationary modeling provides a high degree of similarity with nonstationary calculations. The influence of the degree of wall perforation on the air flow structure, pressure distribution, aerodynamic drag, and energy losses of the vehicle was investigated. Characteristic air flow regimes were identified.

The numerical simulation data presented in this study may be applied in the design and modernization of transport tunnels to reduce energy consumption, increase throughput, and ensure stable airflow conditions around moving uPods. This is particularly important for high-speed systems (exceeding 100 m/s), in which 90 % or more of the drive power demand and overall energy efficiency of the rolling stock are determined by aerodynamic factors, especially during tunnel operation (both solid-wall and mesh configurations). This type of uST transport is intended for the movement of passengers and cargo along the GPV overpass, aimed at ensuring uniform loading of a large-scale self-supporting spacecraft with a length of more than 40,000 km.

Keywords:
aerodynamic drag,
General Planetary Vehicle (GPV),
mesh protective structures,
numerical simulation,
pressure losses,
throughput coefficient, uST.

Введение

Использование тоннельных структур в составе экваториальной эстакады общепланетарного транспортного средства (ОТС) [1], служащей основной отправной точкой для безракетной индустриализации космоса [2], позволяет создать необходимые условия для обеспечения безопасного движения высокоскоростного транспорта. В настоящее время предъявляются всё более жёсткие требования к аэродинамической эффективности, энергетической устойчивости и безопасности инфраструктурных объектов, в том числе тоннелей. С увеличением скорости движения, особенно в ограниченном пространстве тоннельных сооружений, возрастает значимость точного учёта аэродинамических взаимодействий между юнимобилем, воздушным потоком и ограждающими конструкциями – сплошными и сетчатыми [3–8].

Одним из перспективных инженерных решений, направленных на снижение аэродинамического сопротивления и оптимизацию воздушного обмена в тоннелях, является применение воздухопроницаемых (перфорированных) ограждающих конструкций. Они могут служить барьером, предотвращающим попадание крупных объектов, животных, птиц или посторонних лиц в тоннель, не создавая полностью закрытого пространства. Это особенно актуально для тоннелей, расположенных в природных или открытых зонах.

Перфорированные стенки представляют собой конструкции с системой отверстий или щелей, обеспечивающих частичное пропускание воздуха сквозь ограждение. Использование данных сооружений позволяет существенно изменить структуру течения воздуха в тоннеле, снизить избыточное давление перед транспортным средством, уменьшить амплитуду аэродинамических импульсов, а также ослабить волновые и поршневые эффекты, возникающие при высокоскоростном движении. Кроме того, подобные конструкции способствуют более равномерному распределению давления вдоль тоннеля, что положительно сказывается на комфорте пассажиров, снижает уровень шума и вибраций, уменьшает нагрузку на вентиляционные системы.

Применение сетчатых стенок особенно актуально в высокоскоростных тоннелях, где интенсивные аэродинамические явления могут вызывать значительные энергетические потери (до 50 % и более) и негативно влиять на динамическую устойчивость движения.

Проектирование и оптимизация таких конструкций требуют глубокого понимания сложных аэродинамических процессов, возникающих при взаимодействии воздушного потока с перфорированными поверхностями. Традиционные методы расчёта, основанные на упрощённых моделях, часто не дают возможности адекватно учесть влияние геометрии отверстий, степени перфорации и режимов течения воздуха на общую аэродинамическую картину. В этой связи особую актуальность приобретает использование численных методов моделирования, позволяющих с высокой точностью воспроизводить физику течения воздуха и оценить аэродинамические характеристики юнимобиля, движущегося в тоннеле, при различных параметрах конструкции.

Настоящая работа направлена на создание и апробацию эффективной численной методики анализа аэродинамики в транспортных тоннелях с воздухопроницаемыми стенками. Основная цель исследования – выявление закономерностей влияния степени перфорации стен тоннеля на сопротивление воздушному потоку, распределение давления и энергетические потери при движении транспортного состава, а также рассмотрение возможности использования упрощённых (стационарных) моделей для инженерных расчётов.

Полученные результаты могут применяться при проектировании новых и модернизации существующих тоннельных сооружений, обеспечивая повышение их энергоэффективности, эксплуатационной надёжности и комфорта для пользователей.

Методика расчёта характеристик воздухопроницаемых стен

При численном моделировании сетчатых конструкций [9], размещаемых в транспортных тоннелях, возникает ряд трудностей, связанных с построением адекватной конечно-элементной модели. Основная проблема – необходимость детального воспроизведения сложной геометрии сетчатых элементов на значительной протяжённости, что требует немалых вычислительных ресурсов и времени на проведение расчётов. Соответственно, актуальны разработка и применение альтернативных подходов, позволяющих упростить моделирование без существенной потери точности.

В подобном случае эффективным является метод последовательного моделирования [10]. Его суть заключается в предварительном определении аэродинамических характеристик сетчатой конструкции, в частности зависимости потерь давления от скорости воздушного потока. Эти данные могут быть рассчитаны как экспериментально, так и с помощью локального численного моделирования участка с сеткой. Полученные результаты используются в качестве входных параметров при моделировании всего тоннеля, где сетчатая конструкция представляется

в виде граничного условия на стенке с эквивалентными аэродинамическими свойствами. Такой подход позволяет значительно снизить вычислительные затраты при сохранении приемлемой точности моделирования аэродинамических процессов в транспортных тоннелях.

Постановка задачи

Цель – определение зависимости потерь давления в сетчатых конструкциях от скорости воздушного потока при различных значениях коэффициента пропускной способности (площади перфорации). Полученные данные позволят обоснованно подобрать оптимальные параметры реальных сетчатых ограждений с учётом их аэродинамических характеристик, обеспечивая баланс между конструктивными требованиями и минимизацией аэродинамических потерь в транспортных тоннелях. Для проведения численного анализа разработана расчётная модель, представленная на рисунке 1. Конечно-элементная модель отображена на рисунке 2.

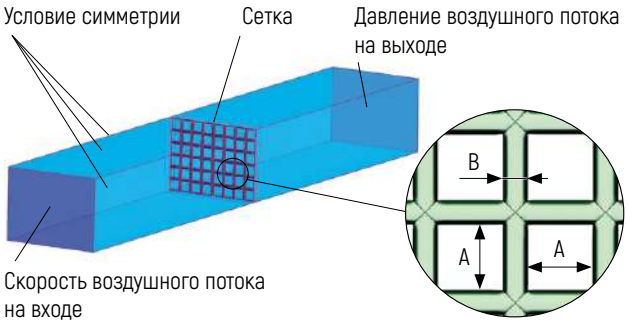


Рисунок 1 – Расчётная модель

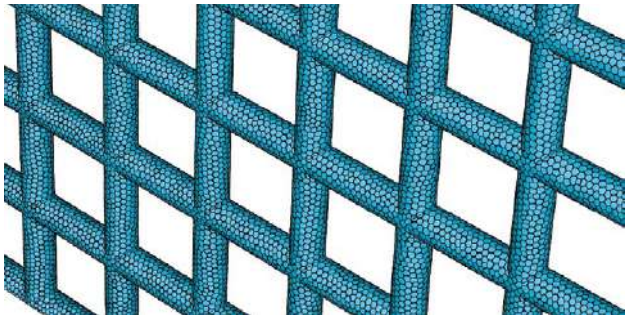


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель перфорации (сетки)

Разработанная методика, базирующаяся на использовании коэффициента пропускной способности, применима для классов геометрически подобных сеток с варьирующимися размерами квадратных ячеек (в данном случае в диапазоне 5–50 мм) при неизменной форме. Корректность такого подхода обусловлена сохранением динамического подобия воздушного потока, при котором влияние абсолютного линейного размера ячейки на аэродинамическое сопротивление минимально и определяющим параметром остаётся коэффициент пропускной способности.

Под коэффициентом пропускной способности понимается доля общей площади поверхности сетчатой конструкции, приходящаяся на отверстия для циркуляции воздушного потока. Указанный параметр выражается в виде отношения суммарной площади всех отверстий к общей площади рассматриваемого участка конструкции и служит характеристикой проницаемости для потока:

$$\varphi_п = \frac{S_{отв}}{S_{общ}} 100\ \%,$$

где $\varphi_п$ – коэффициент пропускной способности, %;

$S_{отв}$ – суммарная площадь отверстий, м^2;

$S_{общ}$ – общая площадь конструкции, м^2.

Варьируя геометрические параметры конструкции, а именно размеры *A* и *B* (рисунок 1), можно сформировать ряд конфигураций с различным коэффициентом пропускной способности – от 20 до 95 %.

В таблице 1 представлены значения коэффициента пропускной способности для некоторых видов сварных сеток, отличающихся геометрией ячеек и диаметром проволоки. Выбор типа сетки обусловлен минимальными производственными отходами и благоприятными аэродинамическими характеристиками, обеспечиваемыми круглым сечением проволоки и отсутствием острых кромок.

Таблица 1 – Значения коэффициента пропускной способности для различных видов сварных сеток

Размер ячейки, мм	Диаметр проволоки, мм	Коэффициент пропускной способности, %
10 × 10	0,6	89
15 × 15	1,5	83
15 × 15	4	62
15 × 15	5	56
25 × 25	1,2	91
50 × 50	1,8	93

При подборе сетчатых ограждающих конструкций для проектирования транспортных тоннелей необходимо учитывать потери давления, условия эксплуатации и прочностные характеристики (для обеспечения безопасности).

В качестве исходных данных для численного моделирования принимаются параметры воздушного потока и окружающей среды, соответствующие стандартным атмосферным показателям. На входе в расчётную область задаётся скорость воздушного потока в диапазоне от 1 до 90 м/с. Давление окружающей среды принимается равным 101 325 Па, температура – 20 °С. В качестве рабочей среды рассматривается воздух.

Результаты расчёта и их анализ

В результате проведённых численных расчётов получены зависимости потерь полного давления от скорости воздушного потока для различных значений коэффициента пропускной способности. Данные зависимости могут быть использованы в качестве альтернативного граничного условия на поверхности тоннеля в области размещения сетчатой конструкции, что позволяет учитывать её аэродинамическое сопротивление без необходимости явного моделирования геометрии. На рисунке 3 представлена типовая зависимость потерь полного давления от скорости воздушного потока при коэффициенте пропускной способности в диапазоне от 20 до 90 %.

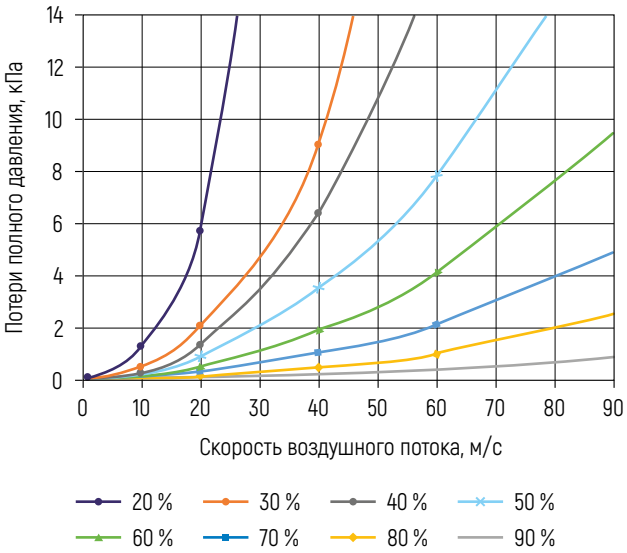


Рисунок 3 – Графики зависимости потерь полного давления от скорости воздушного потока при различных коэффициентах пропускной способности сетки

На рисунке 4 представлено характерное распределение полного давления на поверхности сетчатой конструкции, а также поле скоростей воздушного потока для конфигурации сетки с коэффициентом пропускной способности 60 % при входной скорости потока 90 м/с. Как видно, максимальные значения полного давления наблюдаются в лобовой (наветренной) части сетки, что обусловлено прямым воздействием воздушного потока. В области отверстий происходит перераспределение потока, сопровождающееся локальным увеличением скорости. Подобная картина характерна для всех исследованных конфигураций, однако степень выраженности скачков давления варьируется в зависимости от геометрических параметров и уровня пропускной способности сетки.

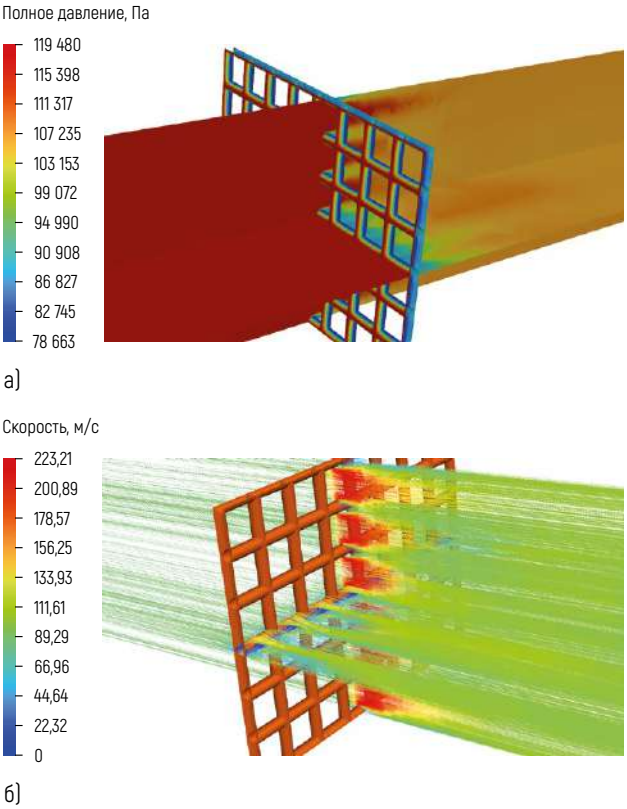


Рисунок 4 – Распределение полного давления (а) и скорости воздушного потока (б) в сетке

Графики, представленные на рисунке 3, демонстрируют, что коэффициент пропускной способности существенно изменяет величину потерь полного давления. Повышение плотности сетчатой структуры приводит к росту аэродинамического сопротивления, что требует дополнительных

энергетических затрат на его преодоление воздушным потоком. Степень этого влияния обуславливается геометрическими характеристиками сетки и будет уточняться при дальнейшем анализе в составе путевой инфраструктуры высокоскоростного uST.

Полученные зависимости могут быть интегрированы в более масштабные численные модели, включающие перфорированные конструкции, где сетка рассматривается как пористый элемент с эквивалентными аэродинамическими свойствами. В таких моделях потери полного давления на поверхности сетки могут быть выражены через нормальную составляющую скорости воздушного потока с использованием следующего соотношения [11]:

$$\Delta P = K_L \frac{\rho v^2}{2},$$

где ΔP – потери полного давления, Па;

K_L – коэффициент потерь давления (определяемый по результатам численного моделирования сетки);

ρ – плотность воздушного потока, кг/м^3;

v – скорость воздушного потока по нормали к сетке, м/с.

Данное выражение позволяет учитывать влияние сетчатых конструкций на аэродинамические характеристики воздушного потока без необходимости детального моделирования геометрии в рамках крупномасштабных расчётов.

Сравнительный анализ методики расчёта в стационарной и нестационарной постановке

При численном моделировании аэродинамических процессов в транспортном тоннеле с сетчатыми ограждающими конструкциями особое значение приобретает корректность выбора расчётного подхода. Одним из распространённых является метод продувки, позволяющий в сжатые сроки получить оценку аэродинамических характеристик. Однако при его применении необходимо учитывать принципиальные отличия рассматриваемой задачи от классической схемы продувки в замкнутом тоннеле. В частности, в случае перфорированных стенок воздушный поток, не ограниченный сплошной конструкцией, взаимодействует как с внутренним, так и с внешним объёмом воздуха.

Если в расчётной постановке задаётся движение воздуха только внутри тоннеля, а внешняя область остаётся неподвижной, то часть кинетической энергии воздушного потока будет рассеиваться через перфорацию, что приведёт к искусственному снижению его скорости вблизи юнимобиля. Это исказит результаты при использовании стационарного моделирования, когда транспортное средство считается неподвижным, а поток воздуха движется относительно него. Значит, скорость воздуха на входе в расчётную область должна задаваться одинаковой внутри тоннеля и в окружающем его внешнем пространстве, что позволяет корректно воспроизвести условия обтекания при наличии воздухопроницаемых стенок. Однако возникает необходимость верификации модели на предмет её физической и численной адекватности.

С учётом невозможности проведения натурных испытаний наиболее обоснованным в данном случае является использование нестационарного численного моделирования с применением динамически перестраиваемой (подвижной) расчётной сетки. Этот метод, зарекомендовавший себя как эффективный инструмент в ряде аналогичных задач, позволяет напрямую оценить аэродинамическое взаимодействие транспортного средства и воздушного потока при движении в тоннеле с перфорированными стенками. Главный недостаток указанного подхода – высокая вычислительная трудоёмкость, обусловленная необходимостью пошагового расчёта аэродинамических характеристик на каждом временном этапе движения.

В связи с этим в рамках настоящего исследования выполнен эталонный нестационарный расчёт, а найденные значения сопоставлены с результатами, полученными по упрощённой стационарной методике. При достижении удовлетворительного совпадения ключевых параметров (например, распределения давления и силы сопротивления) дальнейшее моделирование будет проводиться с использованием стационарного подхода как более ресурсоэффективного при сохранении приемлемой точности.

Постановка задачи

Цель – определение аэродинамического сопротивления подвижного состава, движущегося в тоннеле, который имеет сетчатые ограждающие конструкции (рисунок 5). Для её достижения применена нестационарная численная методика, основанная на использовании динамически перестраиваемой расчётной сетки, которая позволяет точно воспроизвести движение объекта в тоннеле и взаимодействие с воздушным потоком. Сетки в аэродинамическом тоннеле монтируются в виде плоских элементов, без придания им радиальной кривизны или иной формы пространственного изгиба.

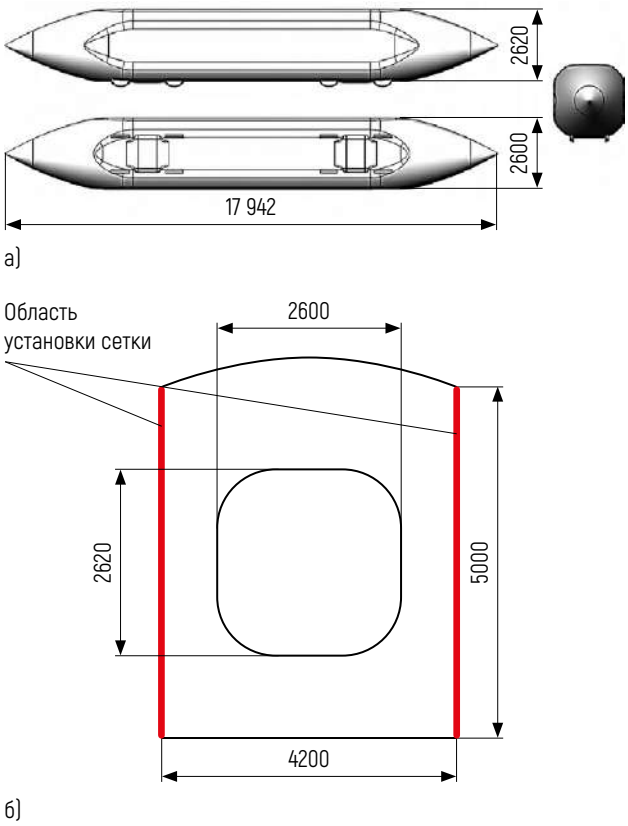


Рисунок 5 – Размеры модели: а – юнимобиля; б – тоннеля

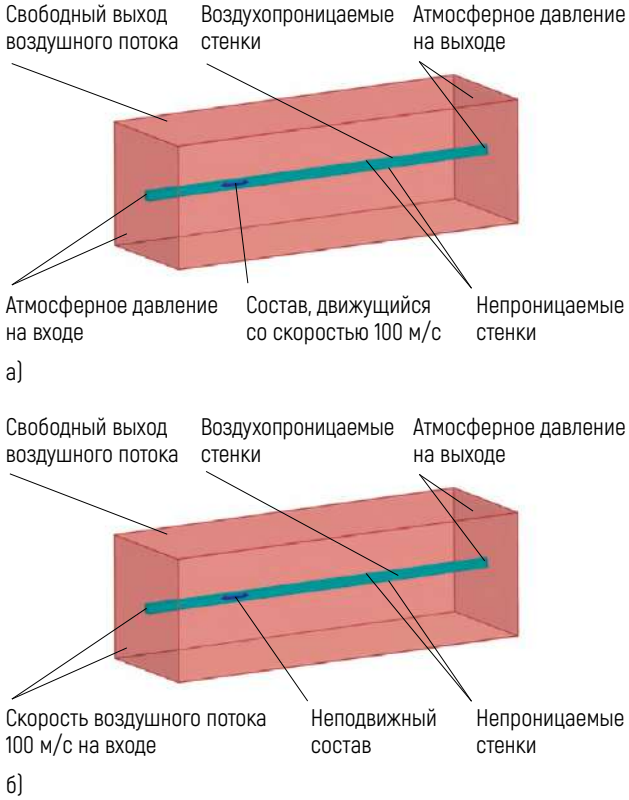


Рисунок 6 – Расчётная модель:
а – нестационарная постановка; б – стационарная постановка

Дополнительно выполнено моделирование по упрощённой стационарной схеме, реализованной с помощью метода продувки. Это позволило провести сопоставление двух подходов с целью оценки точности и применимости стационарной методики для дальнейших расчётов.

Используемые геометрические модели полностью идентичны (рисунок 6), различия касаются исключительно постановки граничных условий, отражающих особенности каждого метода.

Сравнительный анализ проведён для случая, когда коэффициент пропускной способности перфорации стенок тоннеля составляет 60 %. Такой уровень проницаемости обеспечивает значимый обмен воздуха между внутренним и внешним объёмами, что критически влияет на распределение давления и скорости воздушного потока, а следовательно, на величину аэродинамического сопротивления. Результаты анализа позволяют оценить зависимость точности расчёта от выбранной методики и изучить возможность применения стационарного подхода в качестве инженерного инструмента при проектировании и оптимизации транспортных систем.

Таким образом, проведение расчётов двумя различными методами – нестационарным с динамически перестраиваемой сеткой и стационарным методом продувки – даёт возможность определить величину аэродинамического сопротивления и достоверность упрощённого подхода при наличии перфорированных стенок тоннеля. Полученные результаты станут основой для дальнейшего анализа влияния параметров перфорации на характеристики воздушного потока и могут быть использованы при разработке рекомендаций по оптимизации аэродинамики подвижного состава в ограниченном пространстве.

Исходные данные и методика расчётов

При проведении моделирования использовались следующие настройки физической модели:

- воздух моделировался как идеальный газ с помощью уравнения состояния идеального газа для учёта изменений плотности в потоке;
- для расчёта вязкости применялась модель Сазерленда [12], учитывающая зависимость вязкости от температуры;

• решение уравнений осуществлялось посредством решателя на основе плотности (density-based solver), который обеспечивает более точное моделирование воздушных потоков с изменяющейся плотностью;

• для адекватного описания пограничного слоя и турбулентных процессов использовалась модель турбулентности k-ω SST (shear-stress transport).

Исходные данные для нестационарного расчёта:

• скорость движения транспортного средства – 100 м/с;

• давление окружающей среды – 101 325 Па;

• среда – воздух;

• температура – 20 °С;

• условие потерь давления на боковых стенках тоннеля, соответствующих сетке с коэффициентом пропускной способности 60 % (по вышеуказанным расчётным данным).

Исходные данные для стационарного расчёта:

• скорость воздушного потока – 100 м/с;

• давление окружающей среды – 101 325 Па;

• среда – воздух;

• температура – 20 °С;

• условие потерь давления на боковых стенках тоннеля, соответствующих сетке с коэффициентом пропускной способности 60 % (по вышеуказанным расчётным данным).

Результаты расчёта и их анализ

В результате проведённых расчётов найдены значения сил сопротивления, влияющих на подвижной состав при его перемещении в тоннеле с воздухопроницаемыми стенками. Сравнительный анализ, выполненный с использованием стационарного и нестационарного подходов, позволил выявить особенности аэродинамического взаимодействия в различных режимах движения. Полученные данные представлены на рисунке 7, где продемонстрированы различия в распределении сопротивлений в зависимости от выбранной методики расчёта.

Рисунок 7 свидетельствует о высоком уровне сходства значений, полученных с использованием нестационарной и стационарной методик расчёта. Средняя величина аэродинамического сопротивления юнимобиля по результатам нестационарного анализа равна 3623 Н, тогда как при стационарном подходе – 3495 Н. Таким образом, относительное расхождение между двумя методами составляет около 3,5 %, что указывает на приемлемую точность стационарной методики (методики продувки) и подтверждает её применимость для проведения дальнейших исследований.

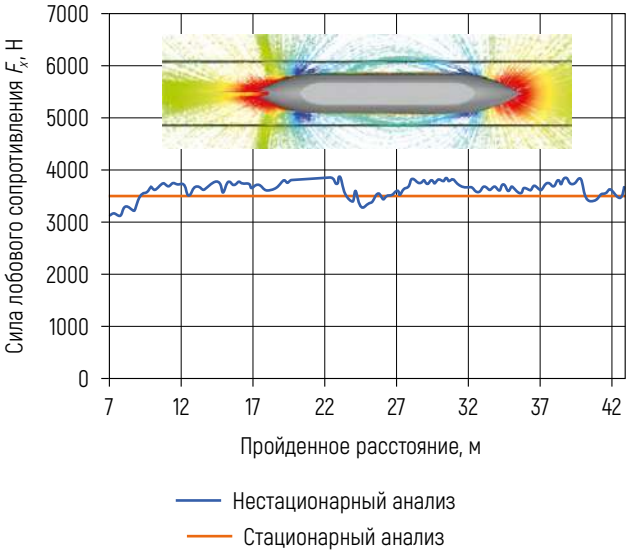


Рисунок 7 – График изменения лобового сопротивления подвижного состава в зависимости от пройденного расстояния

В качестве дополнительного критерия сопоставления итогов расчётов рассмотрено распределение давления по поверхности подвижного состава (рисунок 8). Подобный подход позволяет более детально оценить характер аэродинамического взаимодействия и подтвердить достоверность полученных данных.

Рисунок 8 демонстрирует, что распределение давления по поверхности подвижного состава, вычисленное с помощью стационарного и нестационарного расчётов, практически совпадает. Расхождения составляют не более 0,023 % по величине максимального давления и около 0,6 % по минимальному значению, что свидетельствует о высокой степени соответствия между двумя подходами и подтверждает достоверность результатов.

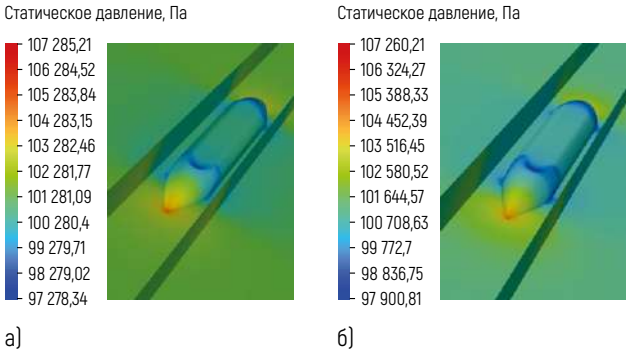


Рисунок 8 – Распределение давления:
а – нестационарный анализ; б – стационарный анализ

Несмотря на близость распределений давления, следует отметить принципиальное различие в характере обтекания подвижного состава в зависимости от выбранной методики моделирования. При нестационарном анализе, соответствующем реальному движению транспортного средства, и при стационарной продувке, имитирующей движение воздушного потока относительно неподвижного объекта, формируются отличающиеся траектории течения воздуха. Эти различия отчётливо визуализированы на рисунке 9 и подчёркивают необходимость комплексного подхода при интерпретации аэродинамических характеристик.

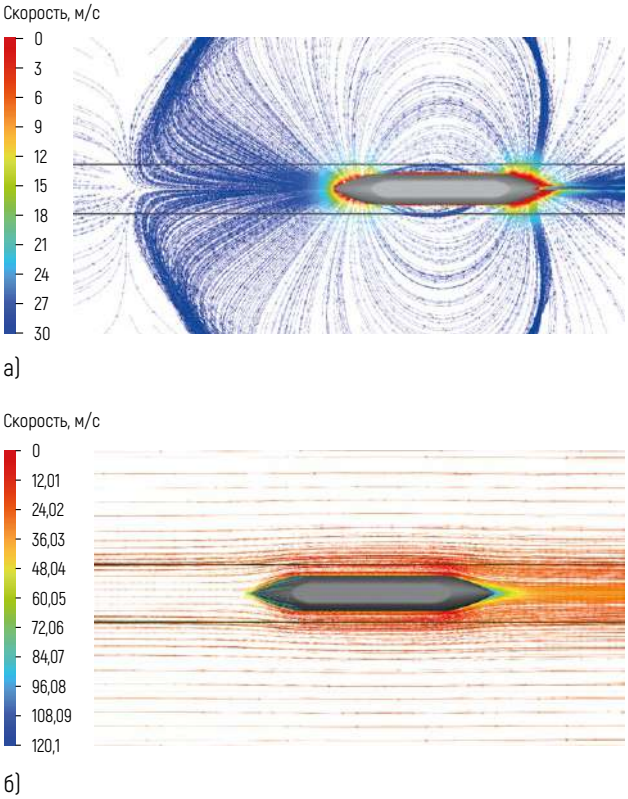


Рисунок 9 – Траектории воздушного потока:
а – нестационарный анализ; б – стационарный анализ

В случае моделирования движения юнимобиля в неподвижной воздушной среде формируется нестационарная картина обтекания, при которой воздушный поток циркулирует вокруг движущегося объекта, приобретая кинетическую энергию непосредственно от него. Это приводит к созданию протяжённой области возмущённого течения воздуха, характеризующейся сложной структурой вихрей и турбулентных образований. В противоположной постановке, т. е. при стационарном моделировании, когда воздух перемещается относительно неподвижного транспортного средства, воздушный поток уже обладает кинетической энергией, которую он частично теряет при контакте с телом, обтекая его и формируя аналогичные аэродинамические структуры.

С точки зрения аэродинамического взаимодействия между телом и окружающей средой оба подхода описывают один и тот же физический процесс – обмен энергией между юнимобилем и воздухом. Согласно закону сохранения энергии полная энергия в замкнутой системе остаётся постоянной, и, следовательно, количество энергии, передаваемой от одного объекта к другому, должно быть эквивалентным вне зависимости от выбранной системы отсчёта.

В первом случае, при движении через неподвижный воздух, кинетическая энергия транспортного средства передаётся воздушной среде, вызывая локальное понижение давления, деформацию воздушного потока и образование турбулентных структур. Эта передача энергии сопровождается увеличением внутренней энергии воздуха и перераспределением его кинетической составляющей в зоне обтекания. Во втором случае, при движении воздуха относительно неподвижного объекта, аналогичный процесс происходит в обратном направлении: кинетическая энергия воздушного потока передаётся телу, вызывая сопротивление движению и аналогичные изменения в структуре потока.

Таким образом, несмотря на различия в относительном движении объектов, суммарный энергетический обмен между юнимобилем и воздушной средой остаётся неизменным. Это подтверждается близкими значениями аэродинамического сопротивления, полученными в двух подходах, и свидетельствует о физической эквивалентности рассматриваемых сценариев с точки зрения аэродинамики. Следовательно, оба метода – как стационарное, так и нестационарное моделирование – являются корректными и эффективными инструментами для оценки аэродинамического сопротивления подвижного состава.

Тем не менее стоит отметить, что стационарный подход, несмотря на вычислительную эффективность и простоту реализации, не позволяет учесть влияние нестационарных эффектов, возникающих при движении транспортного средства, на окружающую инфраструктуру (здания, инженерные сооружения, пассажирские платформы и др.). Нестационарное моделирование обеспечивает более полное описание аэродинамической картины, включая связь с внешней средой, и поэтому становится предпочтительным

при необходимости комплексной оценки аэродинамических воздействий.

Оценка влияния коэффициента пропускной способности воздухопроницаемых стен на аэродинамические характеристики юнимобиля в тоннеле

На основании полученных результатов принято решение использовать стационарный метод моделирования для оценки аэродинамики подвижного состава в тоннеле с сеткой.

Постановка задачи

Цель – изучение аэродинамического влияния сетчатых ограждающих конструкций на характеристики юнимобиля в составе транспортного комплекса. Расчётная модель аналогична изображённой на рисунке 6б.

В рамках данного этапа работы проведён комплексный анализ изменений аэродинамических характеристик транспортных средств при взаимодействии с воздухопроницаемыми (сетчатыми) ограждающими конструкциями, обладающими различной степенью перфорации – от полностью сплошных (0 %) до полностью проницаемых (100 %). Исследование направлено на выявление закономерностей влияния степени проницаемости ограждений на структуру обтекания, распределение давления и величину аэродинамического сопротивления юнимобиля.

Исходные данные

В качестве исходных данных приняты:

- площадь миделя юнимобиля – 6,38 м^2;
- скорость воздушного потока – 100 и 166 м/с;
- давление окружающей среды – 101 325 Па;
- среда – воздух;
- температура – 20 °С;
- условие потерь давления на боковых стенках тоннеля, соответствующих сетке с коэффициентом пропускной способности 0, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 и 100 % (по вышеуказанным расчётным данным).

Результаты расчёта и их анализ

Полученные значения аэродинамического сопротивления транспортного средства при различных степенях перфорации ограждающих конструкций и скоростях движения 100 и 166 м/с представлены в таблицах 2 и 3 соответственно.

Эти данные позволяют проследить зависимость сопротивления от степени воздухопроницаемости стенок и оценить влияние скорости воздушного потока на характер взаимодействия с сетчатыми конструкциями.

Таблица 2 – Динамика изменения аэродинамических характеристик в зависимости от проницаемости сетки при скорости движения юнимобиля 100 м/с

Коэффициент пропускной способности, сетки %	F_x давления, Н	F_x вязкости, Н	Суммарный F_x, Н	C_x давления	C_x вязкости	Суммарный C_x	Аэродинамическая мощность, кВт	Δ, %
0	4614	3331	7945	0,118	0,085	0,203	794	203,3
20	4280	2836	6311	0,11	0,073	0,162	631	140,9
30	3597	2056	5653	0,092	0,053	0,145	565	115,8
40	2779	1972	4752	0,071	0,05	0,122	475	81,4
50	2078	1953	4031	0,053	0,05	0,103	403	53,9
60	2069	1960	4029	0,053	0,05	0,103	403	53,8
70	1437	1874	3311	0,037	0,048	0,085	331	26,4
80	981	1873	2854	0,025	0,048	0,073	285	8,9
90	953	1780	2733	0,024	0,046	0,07	273	4,3
100	883	1736	2619	0,023	0,044	0,067	262	0

Таблица 3 – Динамика изменения аэродинамических характеристик
в зависимости от проницаемости сетки при скорости движения юнимобиля 166 м/с

Коэффициент пропускной способности, сетки %	F_x давления, Н	F_x вязкости, Н	Суммарный F_x, Н	C_x давления	C_x вязкости	Суммарный C_x	Аэродинамическая мощность, кВт	Δ, %
0	12 910	9723	22 633	0,119	0,09	0,21	3772	227,3
20	10 951	7984	18 935	0,101	0,074	0,174	3156	173,8
30	10 532	7883	18 415	0,097	0,073	0,169	3069	166,3
40	9888	5121	15 009	0,091	0,047	0,138	2502	117
50	6410	5071	11 481	0,059	0,047	0,106	1914	66
60	6268	5070	11 338	0,058	0,047	0,104	1890	63,9
70	5196	5052	10 248	0,048	0,047	0,094	1708	48,2
80	3050	5006	8055	0,028	0,046	0,074	1343	16,5
90	2805	4518	7323	0,026	0,042	0,068	1220	5,9
100	2399	4517	6916	0,022	0,042	0,064	1153	0

Основным определяемым показателем является коэффициент аэродинамического сопротивления C_x, который складывается из двух составляющих:

- C_x давления – характеризует сопротивление, вызванное распределением давления на поверхности тела, в частности разницей между фронтальным и задним давлением, и обуславливающее возникновение силы сопротивления за счёт инерционного отставания воздушного потока, а также образование зон разрежения;
- C_x вязкости – характеризует сопротивление, вызванное касательными (сдвиговыми) напряжениями вязкого слоя воздуха на поверхности тела. Этот коэффициент отражает влияние вязкости и турбулентности пограничного слоя на сопротивление движению тела.

Из анализа данных, представленных в таблицах 2 и 3, следует, что степень перфорации сетчатых ограждающих конструкций оказывает существенное влияние на аэродинамическое сопротивление, а значит, и на энергозатраты, необходимые для его преодоления. С увеличением плотности (уменьшением проницаемости) сетки наблюдается рост сопротивления, что особенно ярко выражено при высоких скоростях движения транспортного средства.

Так, при скорости юнимобиля 100 м/с аэродинамическое сопротивление возрастает до 203 % по сравнению с базовым случаем открытых бортов тоннеля (100 % перфорации), а при 166 м/с – до 227 %. Это свидетельствует о возрастании энергетических потерь при использовании сплошных или малопроницаемых ограждений.

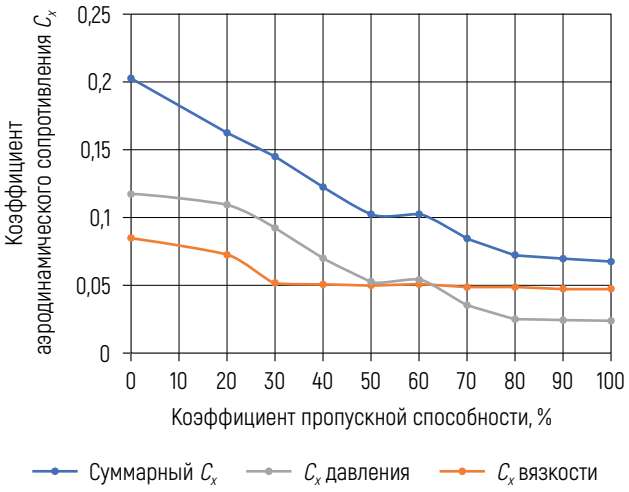
Особый интерес представляют значения сопротивлений при 50 и 60 % перфорации: они оказываются практически идентичными. Таким образом, перфорация в этих пределах может служить ориентиром при проектировании воздухопроницаемых конструкций, обеспечивая приемлемый уровень сопротивления без существенного ухудшения аэродинамических характеристик. Дальнейшее снижение площади отверстий приводит к резкому росту сопротивления и, как следствие, к увеличению энергозатрат, что нежелательно с точки зрения эффективности.

Для того чтобы качественно оценить влияние коэффициента пропускной способности на сопротивление построены графики зависимости суммарного C_x и его составляющих, что наглядно демонстрирует, какая из них наиболее сильно сказывается на энергозатратах (рисунок 10).

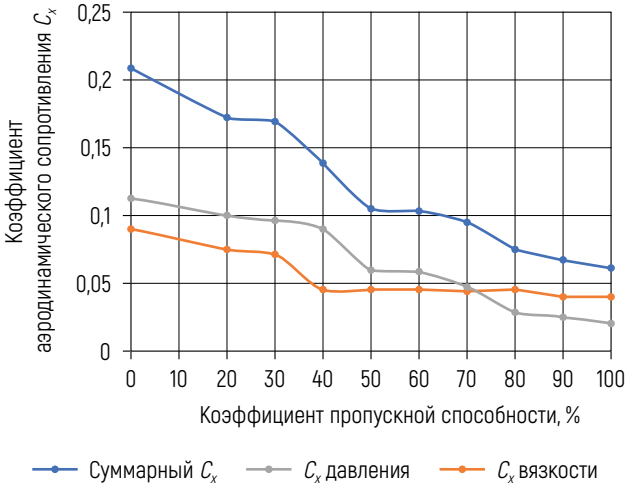
Анализ графиков позволяет понять механизмы формирования аэродинамического сопротивления в зависимости от степени перфорации ограждающих конструкций тоннеля. В частности, прослеживается чёткая взаимосвязь между вкладом составляющих сопротивления – давления и вязкого трения – и степенью воздухопроницаемости стенок.

В диапазоне перфорации 70–100 % основным источником аэродинамического сопротивления выступает вязкое трение. Это объясняется тем, что при высокой

проницаемости стенок воздушный поток свободно покидает тоннельную область, не создавая существенного фронта давления перед юнимобилем. В таких условиях влияние давления на сопротивление минимально, а ключевую роль играют силы трения, возникающие на поверхности подвижного состава и стенок тоннеля. Характер зависимости вязкого трения от степени перфорации в обозначенном диапазоне близок к линейному, что подтверждает устойчивость и предсказуемость данного механизма. При этом оптимальной является перфорация в диапазоне 85–95 %, при которой величина C_x стремится к своему теоретическому минимуму.



а)



б)

Рисунок 10 – Зависимость составляющих C_x от коэффициента пропускной способности:
а – для скорости движения юнимобиля 100 м/с;
б – для скорости движения юнимобиля 166 м/с

В случае снижения перфорации до 50–70 % наблюдается сбалансированное влияние как давления, так и вязкого трения, что указывает на переходный режим, в котором воздушный поток начинает испытывать определённые затруднения при выходе из тоннеля, но ещё не формирует выраженного фронта уплотнения. В рассматриваемом диапазоне аэродинамическое сопротивление возрастает, однако остаётся в пределах допустимого. Вместе с тем значение C_x здесь существенно выше (следовательно, и мощность аэродинамического сопротивления, и мощность привода) – на 40–50 %, что при прочих равных условиях увеличит при скорости движения юнимобиля 166 м/с требуемую мощность привода примерно на 700 кВт (таблица 3). В пересчёте на топливо это приведёт к его перерасходу примерно на 150 кг/ч на каждое транспортное средство. Для парка машин в 1000 единиц это даст перерасход энергии в топливном эквиваленте около 1 млн тонн в год стоимостью более 1 млрд USD, а для 1 млн транспортных средств – 1 млрд тонн топлива в год стоимостью более 1 трлн USD.

Критической является перфорация ниже 50 %. В данном случае давление становится доминирующим фактором сопротивления. Воздушный поток, не имея возможности эффективно покидать тоннель через стенки, начинает скапливаться перед юнимобилем, формируя зону повышенного давления. Одновременно за подвижным составом усиливается область разрежения, что приводит к росту перепада давления и, как следствие, к увеличению аэродинамического сопротивления. Кроме того, в этих условиях значителен и вклад вязкого трения, поскольку взаимодействие воздушного потока с поверхностями, включая стенки тоннеля, становится интенсивнее, что дополнительно повышает энергетические потери.

Полученные данные подтверждают, что сокращение коэффициента пропускной способности сетки ниже 50 % становится причиной резкого ухудшения аэродинамических характеристик подвижного состава. Это связано с усилением тоннельного эффекта, ростом давления перед транспортным средством и увеличением вязкого трения. В совокупности указанные факторы делают такие значения перфорации нецелесообразными с точки зрения аэродинамической эффективности. Оптимальным следует считать диапазон перфорации 85–95 %, как и отмечено выше, при котором достигается баланс между конструктивной прочностью ограждений и минимальными аэродинамическими потерями.

На диаграмме, отображённой на рисунке 11, видно, что увеличение коэффициента пропускной способности влияет на мощность для преодоления аэродинамического сопротивления.

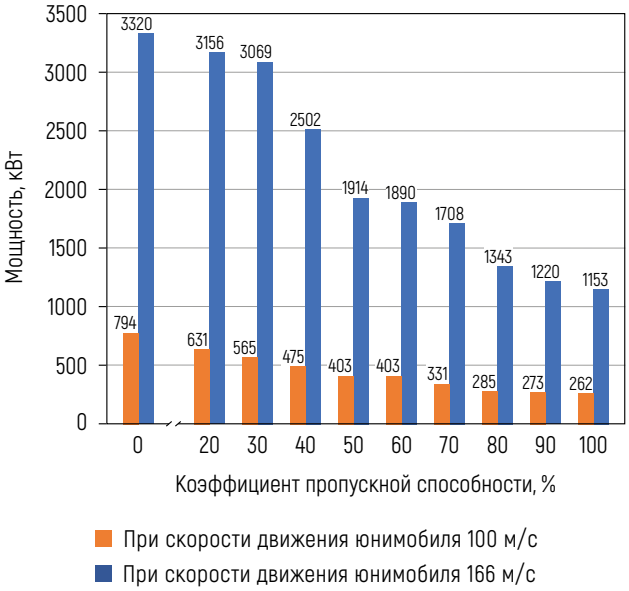


Рисунок 11 – Зависимость мощности для преодоления аэродинамического сопротивления от коэффициента пропускной способности сетки

Для определения зон влияния на характеристики юнимобиля на рисунках 12 и 13 приведены картины распределения давлений и скоростей воздуха для вариантов с коэффициентом пропускной способности сетки 0, 20, 60 и 100 %. Для удобства сравнения шкалы результатов имеют одинаковый диапазон значений для всех вариантов (рисунок 12).

Рисунки 12 и 13 демонстрируют, что с увеличением степени перфорации боковых стенок тоннеля наблюдается снижение интенсивности фронта уплотнения в лобовой части транспортного средства. Это связано со следующим: при большей проницаемости стенок сопротивление сетки уменьшается, что приводит к снижению потерь давления на её поверхности. Поток воздуха получает возможность частично выходить через стенки, тем самым снижая уровень накопления давления перед подвижным составом.

Рассмотрим подробно результаты, представленные на рисунках 13б и 13г при скорости воздушного потока 100 м/с. Вариант 13б характеризуется меньшей степенью перфорации по сравнению с вариантом 13г. При сопоставлении данных конфигураций можно заметить, что в передней части юнимобиля зона торможения потока в первом случае имеет большую протяжённость. Это указывает на выраженное образование фронта уплотнения, а значит, на увеличение давления перед подвижным составом.

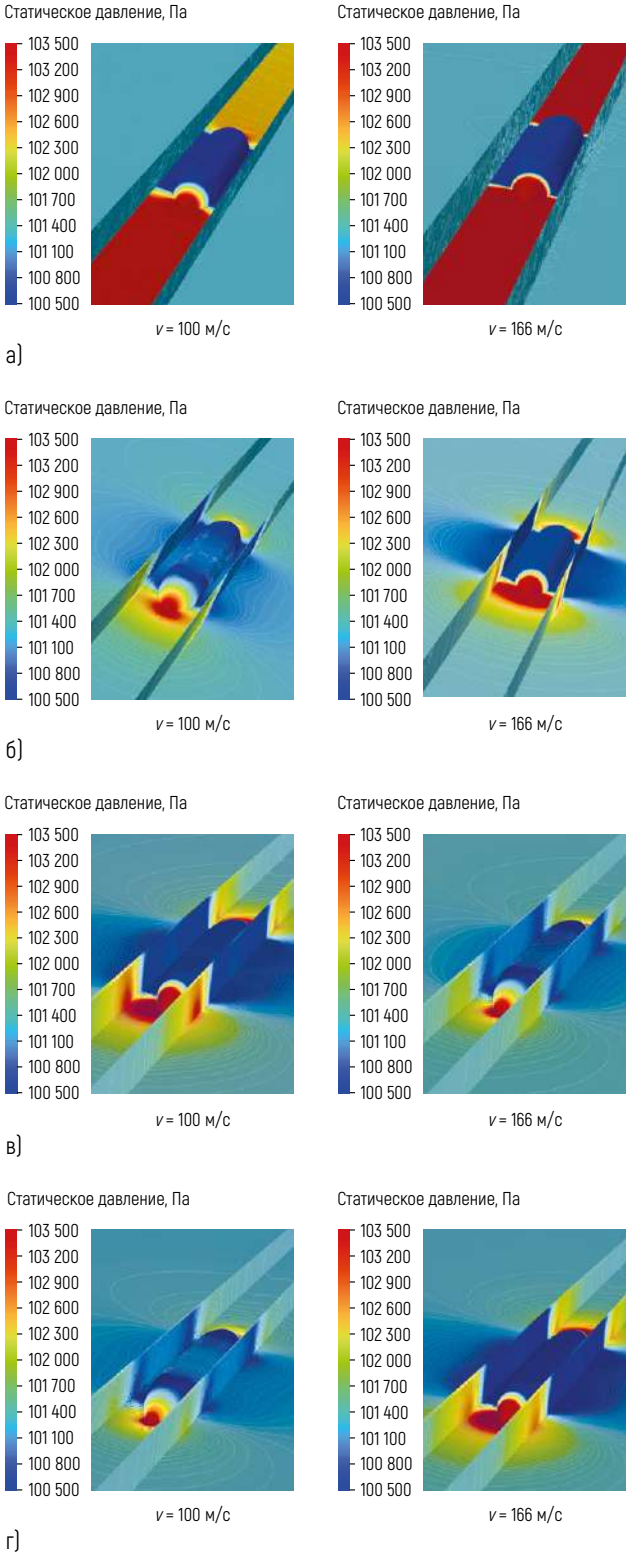


Рисунок 12 – Распределение давлений для различных коэффициентов пропускной способности: а – 0 %; б – 20 %; в – 60 %; г – 100 %

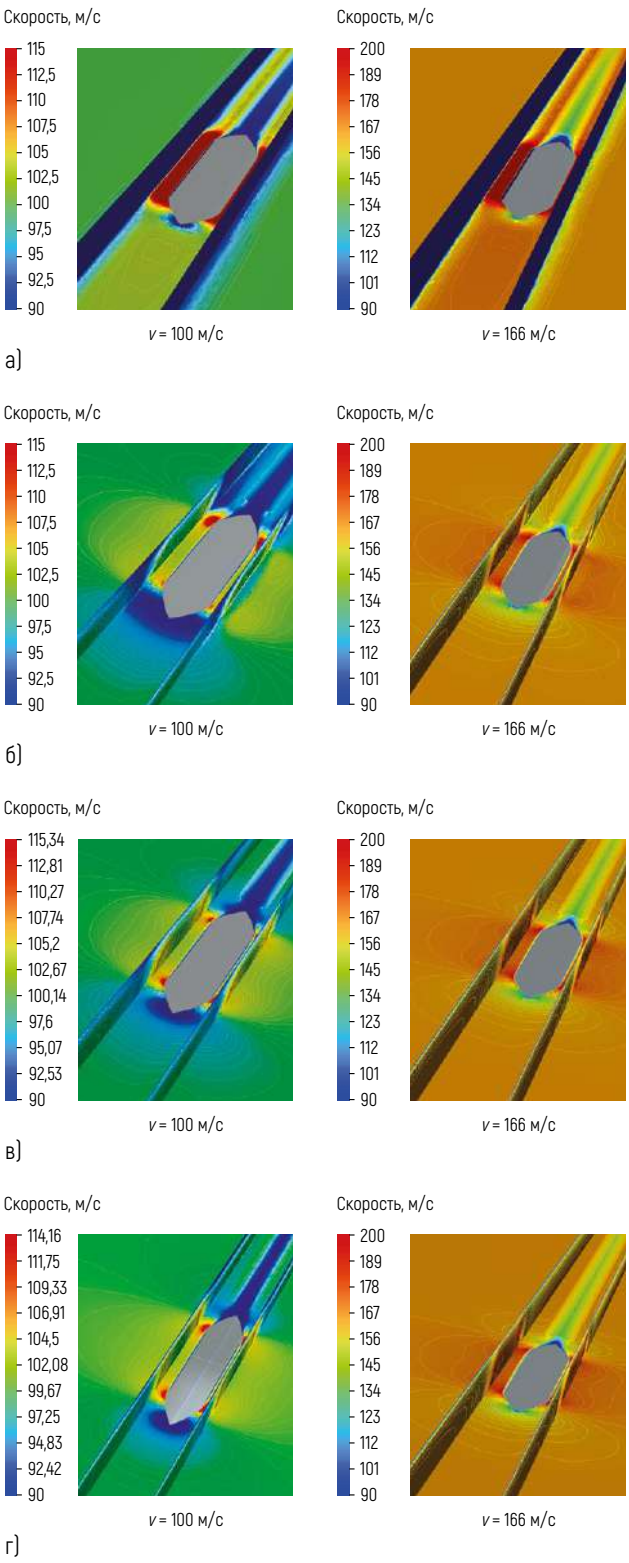


Рисунок 13 – Распределение скоростей воздушного потока для различных коэффициентов пропускной способности: а – 0 %; б – 20 %; в – 60 %; г – 100 %

Дополнительно стоит отметить поведение воздушного потока в задней части транспортного средства. В варианте 13б наблюдается выраженное снижение скорости в исследуемой области, что свидетельствует о формировании зоны разрежения, а также об усилении аэродинамического сопротивления, поскольку перепад давления между передней и задней частями юнимобиля становится более значительным.

В то же время в его центральной части существенных различий между вариантами не имеется. Это объясняется направлением вектора скорости воздушного потока, который в данной области ориентирован почти параллельно поверхности сетки. В результате нормальная составляющая скорости относительно сетки стремится к нулю и поток практически не взаимодействует с перфорированной поверхностью в этой зоне.

Наибольшее влияние перфорации проявляется в переходных зонах – в лобовой и хвостовой частях транспортного средства. Именно здесь направление воздушного потока изменяется и отмечается высокое значение нормальной составляющей скорости относительно сетки, что приводит к повышению скорости вблизи этих участков и, соответственно, к более выраженным аэродинамическим эффектам, связанным с торможением и разрежением потока.

Таким образом, увеличение степени перфорации боковых стенок способствует снижению аэродинамического сопротивления за счёт уменьшения фронта уплотнения и ослабления зоны разрежения, особенно в передней и задней частях юнимобиля. Центральная часть, напротив, остаётся менее чувствительной к изменению проницаемости стенок, что обусловлено особенностями направления воздушного потока в данной области.

Заключение

В ходе проведённого исследования разработана методика расчёта аэродинамического сопротивления транспортных средств в тоннелях с сетчатыми ограждающими конструкциями, основанная на последовательном численном моделировании и сравнительном анализе стационарного и нестационарного подходов. Использование конечно-элементной модели позволило детализировать аэродинамические характеристики сетчатых конструкций и оценить их влияние на потери полного давления в зависимости от скорости воздушного потока и коэффициента пропускной способности. В рамках применяемой методики

сетчатая конструкция рассматривалась как жёсткая и геометрически неизменяемая структура. Предполагалось, что аэродинамическое воздействие воздушного потока не вызывает существенных упругих деформаций проволочных элементов и каркаса сетки.

Результаты численного моделирования показали, что степень перфорации боковых ограждений имеет значительное влияние на аэродинамическое сопротивление юнимобиля. Установлено, что увеличение коэффициента пропускной способности позволяет сократить потери давления за счёт ослабления фронта уплотнения в передней части подвижного состава и уменьшения зоны разрежения в хвостовой области. Данный эффект содействует снижению аэродинамического сопротивления и, как следствие, энергозатрат на преодоление сопротивления воздуха. Кроме того, необходимо акцентировать внимание на прочностных характеристиках самой сетки, а также на определении оптимального соотношения между размером ячейки и толщиной проволоки. Это обусловлено тем, что при неизменных размерах ячейки увеличение диаметра проволоки приводит к уменьшению коэффициента пропускной способности, вызывая повышение аэродинамического сопротивления.

Сравнительный анализ стационарного и нестационарного подходов продемонстрировал высокую степень совпадения результатов (погрешность около 3,5 %), что подтверждает применимость стационарного метода продувки для предварительных расчётов. Вместе с тем нестационарное моделирование обеспечивает более полное представление о динамике взаимодействия между транспортным средством и воздушным потоком, в том числе в контексте оценки нагрузки на окружающую инфраструктуру.

Существенное внимание уделено влиянию коэффициента пропускной способности на аэродинамические характеристики подвижного состава. Установлено, что при значении ниже 40 % резко возрастает аэродинамическое сопротивление, обусловленное усилением тоннельного эффекта и доминированием давления над силами вязкого трения.

В то же время при показателях в диапазоне 50–60 % наблюдается стабилизация аэродинамических параметров между компонентами сопротивления по вязкому трению и давлению.

Визуализация распределения скоростей и давлений подтверждает, что увеличение проницаемости сетчатых конструкций приводит к перераспределению потока, снижению интенсивности фронта уплотнения и, как следствие, уменьшению аэродинамического сопротивления.

Таким образом, оптимизация коэффициента пропускной способности при разработке воздухопроницаемых ограждений тоннелей имеет большое значение. Это даст возможность не только повысить эффективность функционирования транспортных систем, но и существенно сократить энергозатраты. Предложенная методика и полученные данные могут быть использованы при проектировании транспортной инфраструктуры нового поколения, обеспечивая улучшенные аэродинамические характеристики и более устойчивую работу юнимобилей в замкнутых пространствах. Оптимизация сетчатого ограждения позволит снизить требуемую мощность привода подвижного состава при скорости движения 166 м/с (600 км/ч) примерно на 700 кВт, что даст ежегодную экономию около 1000 тонн топлива на каждое транспортное средство, т. е. более 1 млн USD.

Результаты проведённого исследования открывают путь к созданию полноценных прототипов транспортной системы, способной гарантировать стабильное высокоскоростное движение в реальных условиях эксплуатации в сетчатом тоннеле. Высокоскоростные юнимобили становятся ключевым элементом не только будущей эксплуатации, но и процесса строительства взлётно-посадочной эстакады ОТС, выступая в роли мобильных платформ для перевозки персонала, материалов и строительных конструкций.

Разработанные сетчатые ограждения геокосмического транспортного комплекса ОТС снижают аэродинамическое сопротивление на крейсерских скоростях в обслуживающих транспортных системах uST, рассеивают энергию воздушных потоков и обеспечивают защиту от погодных воздействий и внешних угроз – птиц, животных, людей, случайно оказавшихся на пути движения. Прозрачные конструкции дают возможность сохранить визуальный контроль над путевой структурой и естественное освещение, что важно для повышения безопасности и энергоэффективности системы.

Предложенные решения позволяют адаптировать параметры сетчатых ограждений под конкретные участки трассы с учётом климатических особенностей и требований безопасности. Это создаёт основу для масштабирования технологии – от экспериментальных отрезков до глобальных транспортных магистралей.

Таким образом, исследование закладывает научно-техническую базу для принципиально нового класса транспортных систем, сочетающих высокие скорости, энергоэффективность и надёжность в различных условиях эксплуатации.

Список основных источников

1. *Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А.Э. Юницкий. – Силакрогс: ПНБ принт, 2019. – 576 с.*
2. *Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск: Парадокс, 2019. – 240 с.*
3. *Optimal Cross-Sectional Area Distribution of a High-Speed Train Nose to Minimize the Tunnel Micro-Pressure Wave / Y.-C. Ku, J.-H. Rho, S.-H. Yun [et al.] // Structural Multidisciplinary Optimization. – 2010. – Vol. 42. – P. 965–976.*
4. *Kikuchi, K. Optimization of Train Nose Shape for Reducing Micro-Pressure Wave Radiated from Tunnel Exit / K. Kikuchi, M. Iida, T. Fukuda // Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. – 2011. – Vol. 30, iss. 1. – P. 1–19.*
5. *Yao, S. Three-Dimensional Aerodynamic Optimization Design of High-Speed Train Nose Based on GA-GRNN / S. Yao, D. Guo, G. Yang // Science China. Technological Sciences. – 2012. – Vol. 55, iss. 11. – P. 3118–3130.*
6. *Parametric Design and Optimization of High-Speed Train Nose / S.B. Yao, D.L. Guo, Z.X. Sun [et al.] // Optimization and Engineering. – 2016. – Vol. 17, iss. 3. – P. 605–630.*
7. *A Modified Multi-Objective Sorting Particle Swarm Optimization and Its Application to the Design of the Nose Shape of a High-Speed Train / S. Yao, D. Guo, Z. Sun, G. Yang // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2015. – Vol. 9, iss. 1. – P. 513–527.*
8. *Effective Nose Shape for Reducing Tunnel Sonic Boom / M. Iida, T. Matsumura, K. Nakatani [et al.] // Quarterly Report of RTRI. – 1997. – Vol. 38, No. 4. – P. 206–211.*
9. *Li, S. A Pressure-Loss Model for Flow-Through Round-Hole Perforated Plates of Moderate Porosity and Thickness in Laminar and Turbulent Flow Regimes / S. Li, L. Davidson, S. Peng // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2024. – Vol. 226. – 125490.*
10. *Anderson, J.D. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications / J.D. Anderson. – New York: McGraw-Hill, 1995. – 563 p.*
11. *Идельчик, И.Э. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Э. Идельчик; под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.*
12. *Anderson, J.D. Fundamentals of Aerodynamics / J.D. Anderson. – 6th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2016. – 1154 p.*

УДК 629.7.048

Системы жизнеобеспечения пассажирского модуля общепланетарного транспортного средства

А.Э. Юницкий[1,2]
доктор философии транспорта

Е.В. Бобр[2]

С.В. Артюшевский[2,3]

[1] ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

[2] ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

[3] Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Беларусь

Изучены существующие системы жизнеобеспечения (СЖО), сделан анализ их применимости и оптимизации для использования в пассажирском модуле общепланетарного транспортного средства (ОТС).

В контексте стандартов, нормативных актов и технических требований рассмотрены системы вентиляции, кондиционирования и очистки воздуха, регулирования температуры, а также нормы радиационного фона. Цель работы – определение состава СЖО и компоновка её узлов в пассажирском модуле ОТС. Особое внимание уделяется техническим характеристикам, параметрам функционирования и выявлению преимуществ перечисленных систем, их влиянию на безопасность и комфорт пассажиров во время движения – при подъёме на орбиту и спуске на Землю.

Результаты исследования позволяют подобрать элементы СЖО, выделить ключевые аспекты оптимизации и совершенствования существующих систем, а также установить направления дальнейшей разработки и компоновки пассажирского модуля ОТС.

Ключевые слова:
безопасность пассажиров, компоновка пассажирского модуля, общепланетарное транспортное средство (ОТС), пассажирский модуль, системы жизнеобеспечения.

UDC 629.7.048

Life Support Systems for Passenger Module of General Planetary Vehicle

A. Unitsky [1, 2]
Dr. of Philosophy
in Information Technologies
(Transport)

Y. Bobr [2]

S. Artyushevsky [2, 3]

[1] Astroengineering Technologies LLC,
Minsk, Belarus

[2] Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

[3] Belarusian State University
of Transport,
Gomel, Belarus

This study examines existing life support systems (LSS), analyzing their applicability and optimization for use in the passenger module of the General Planetary Vehicle (GPV).

In the context of standards, regulations, and technical requirements, the study looks into ventilation, air conditioning, and air purification systems, temperature control, as well as radiation background norms.
The aim of this work is to determine the composition of the LSS and to arrange its components within the passenger module of the GPV.
Particular attention is given to the technical specifications, operational parameters, and the advantages of these systems, alongside their impact on passenger safety and comfort during transit – specifically during ascent to orbit and descent back to Earth.

The findings of this research enable the selection of LSS components, highlight key aspects for optimizing and improving existing systems, and establish directions of the further development and arrangement of the passenger module of the GPV.

Keywords:
General Planetary Vehicle (GPV),
life support systems,
passenger module,
passenger module arrangement,
passenger safety.

Введение

Для того чтобы люди могли и дальше осваивать космическое пространство, следует постоянно развивать уже имеющиеся технологии, внедрять новое оборудование, использовать альтернативные материалы и источники энергии. Безопасность космонавтов, космических станций, баз и космических кораблей по-прежнему находится в приоритете. Именно с вопроса безопасности и начинается изучение потенциала человеческого организма, его работоспособности во время пилотируемых полётов в космос.

За безопасность и сохранность людей на околоземной орбите отвечает система жизнеобеспечения (СЖО) – совокупность оборудования, предназначенного для создания в космическом аппарате необходимых условий жизнедеятельности космонавта.

Исследования в области СЖО для замкнутых пространств выявляют широкий спектр возможностей для успешного применения этих систем в рамках пассажирского модуля общепланетарного транспортного средства (ОТС). Таким образом, цель данной работы – определение состава СЖО и компоновка её узлов в пассажирском модуле ОТС.

В статье представлен вариант компоновки отсеков модуля. В качестве основных факторов, влияющих на наличие и объём узлов СЖО в ограниченных условиях, приняты количество перевозимых пассажиров и время их нахождения в модуле.

Состав и назначение системы жизнеобеспечения, обзор готовых решений

Во время взлёта/посадки и на околоземной орбите человек пребывает в замкнутой системе, будучи полностью изолированным от внешней среды. На этот период пассажирский модуль становится замкнутой экосистемой для находящихся внутри людей, соответственно, он должен обеспечить их защиту, безопасность, комфорт и информирование.

Изучение существующих и прошедших испытание эксплуатацией систем для космических аппаратов позволяет подобрать аналоги для модуля ОТС с целью оценки их преимуществ и недостатков. По назначению подобное оборудование можно разделить на четыре группы:

- система поддержания базовых биологических функций (воздух и климат, вода и санитария, питание);
- система безопасности (аварийные механизмы, защита от внешних угроз, пожарная безопасность);
- развлекательные и сервисные системы (интерьер и комфорт, мультимедиа, связь);
- система управления и резервирования.

Система поддержания базовых биологических функций

Воздух и микроклимат являются ключевыми факторами для поддержания жизни человека при нахождении его в замкнутой системе вдали от Земли.

Система рециркуляции атмосферы построена на основе двух контуров. Первый задействует цеолитовые поглотители CO_2 (технология используется на подводных лодках). Второй реализует электролиз воды для генерации кислорода, располагая расчётным запасом воды в специальных ёмкостях.

Температурный контроль выполняется жидкостными контурами, аналогичными имеющимся в модулях Международной космической станции (МКС) и способными поддерживать комфортную температуру 20–24 °C. В аварийном режиме могут применяться термоодеяла, которые содержат фазопереходный материал (создан NASA для лунных миссий).

Водообеспечение организовано по замкнутому циклу. Система конденсации влаги из воздуха дополнена блоком переработки урины (мочи). Все жидкости проходят УФ-стерилизацию перед повторным использованием.

Санузел модуля оборудован вакуумным туалетом с анатомическими сиденьями (аналогично системе в Boeing Starliner) и складной раковиной с водяным распылителем, экономящим до 80 % воды по сравнению с традиционными системами.

Пищевой блок включает зону хранения индивидуального сухого пайка для аварийных случаев. Запас продуктов рассчитан на сутки. Приём пищи осуществляется на посадочном месте.

Система безопасности

Основу системы безопасности составляет комплекс рабочего и/или аварийного отделения модуля, включающий быстродействующие механизмы, которые способны за доли секунды прервать соединение с кольцевой конструкцией ОТС для оперативной замены прибывшей капсулы на готовую к отправке. Данный комплекс позволяет запараллелить этапы загрузки/разгрузки и подъёма/спуска ОТС. Механизмы крепления также обеспечивают поворот модуля относительно корпуса ОТС во время полёта для правильной ориентации пассажирского кресла, поскольку положение пола в модуле будет постоянно

меняться из-за смены направления результирующего вектора действующих сил (гравитация, ускорение разгона/торможения и центробежные силы).

Защита от внешних угроз осуществляется за счёт выполнения корпуса модуля ОТС по трёхслойной схеме. Внешний слой из карбида кремния предохраняет от микрометеоритов (аналогичная защита имеется на модулях МКС). Средний слой представляет собой комбинацию кевларового волокна и алюминиевой пены (такая конструкция успешно применяется в современных космических кораблях для амортизации). Внутренний герметичный слой изготавливается из полимерных композитов на основе полиэтилена высокой плотности.

Радиационная защита реализована посредством системы водяных панелей, расположенных по периметру жилого отсека (технология, испытанная на МКС). Дополнительно используется слабое магнитное поле (принцип мини-магнитосферы, разрабатываемый для марсианских миссий).

Система пожарной безопасности включает сеть датчиков дыма и температуры (как и на МКС). Для тушения применяется азотная система, которая позволяет быстро снижать концентрацию кислорода в очаге возгорания без вреда для пассажиров.

Развлекательные и сервисные системы

Кресла пассажиров сконструированы на основе авиационных сидений бизнес-класса. Они могут автоматически менять угол наклона от 30 до 70° и оснащены системой массажа (аналогично креслам в Airbus A380).

Осветительная система использует адаптивные LED-панели, способные имитировать естественный световой цикл (технология, применяемая на МКС для регулирования циркадных ритмов). Дополнительно предусмотрен режим полярного сияния для релаксации.

Виртуальные иллюминаторы представляют собой 4K-экраны, на которые транслируются изображения с внешних камер (как в Boeing 787 Dreamliner). Дополненная реальность позволяет отображать информацию о видимых объектах.

Развлекательная система включает VR-очки с библиотекой контента и голографический проектор (прототип – Microsoft HoloLens 2).

Система связи использует лазерные каналы передачи данных (аналогичные разрабатываемым для проекта Starlink) с задержкой менее 1 с. Видеосвязь с Землёй осуществляется через ретрансляторы, размещённые на кольцевой конструкции ОТС.

Система управления и резервирования

Все критические системы дублированы по принципу «два независимых контура» (как в космических кораблях Crew Dragon). Управление может выполняться в трёх режимах: автоматическом (на базе искусственного интеллекта), ручном (с помощью сенсорных панелей) и дистанционном (из диспетчерской с Земли). Ручное управление предусматривается для систем комфорта, освещения и прочих некритичных опций.

Все системы спроектированы с учётом требований космической радиационной стойкости (стандарты NASA для пилотируемых миссий).

В пассажирском отсеке следует создавать искусственную атмосферу и климат для обеспечения комфортного существования человека. Эти условия поддерживаются в течение всего полёта путём подачи в отсек необходимых человеку веществ и удаления продуктов его жизнедеятельности (рисунок 1) [1].

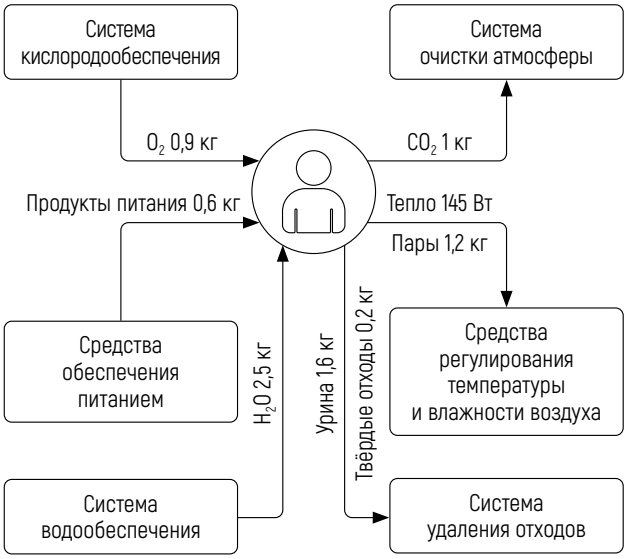


Рисунок 1 – Среднесуточная потребность организма человека в массо- и энергообмене с окружающей средой, а также системы и средства, обеспечивающие эти процессы

Остались вне блока, но также играют немаловажную роль в жизнедеятельности человека средства регулирования давления в отсеке, средства санитарно-бытового обеспечения, средства индивидуальной защиты пассажиров. Системы кислородообеспечения и очистки атмосферы часто объединяют в одну – систему обеспечения газового состава атмосферы.

Рассмотренный массо- и энергообмен человека с окружающей средой определяет основные задачи СЖО, её элементы и их назначение.

При оптимизации СЖО с учётом специфики пассажирского модуля ОТС и времени его подъёма к космическому индустриальному ожерелью «Орбита» (КИО «Орбита») можно выделить следующие системы:

- система обеспечения газового состава атмосферы;
- система водообеспечения;
- система контроля температуры и влажности газовой среды;
- система регулирования давления;
- система удаления отходов жизнедеятельности.

Указанные системы образуют оптимальный комплекс СЖО, необходимый для поддержания жизни человека в замкнутом пространстве пассажирского модуля, нормального эмоционального состояния и комфорта в течение всего времени выхода на орбиту. При этом в зависимости от режимов работы ОТС время полёта составит 2–5 ч. Например, при комфортном ускорении 0,5 м/с^2 в процессе набора первой космической скорости полёт на орбиту займёт около 5 ч (разгон корпуса до 55 м/с – 2 мин, подъём на высоту Кармана 100 км с радиальным ускорением 0,03 м/с^2 – 30 мин, разгон корпуса до первой космической скорости 7,91 км/с – 4,4 ч).

Требования к системе жизнеобеспечения пассажирского модуля ОТС и её анализ

Система обеспечения газового состава атмосферы

Космические корабли и станции снабжаются двухкомпонентной газовой средой, состоящей из кислорода и азота, а следовательно, максимально приближенной к земным параметрам.

Рассматриваемая система обязана обеспечивать подачу в модуль кислорода в количестве 0,9 кг/сут на одного человека и поддерживать парциальное давление O_2 в диапазоне значений 140–160 мм рт. ст. При этом должны осуществляться сбор и удаление из атмосферы углекислого газа в количестве около 1 кг/сут на одного человека и поддерживаться парциальное давление CO_2 на уровне 0,5–3 мм рт. ст. [1]. Кроме того, в общие задачи системы обеспечения газового состава атмосферы входит очистка воздуха от вредных микропримесей, пыли и микроорганизмов.

Источником кислорода на борту модуля ОТС служит система запасов O_2, так как, исходя из продолжительности подъёма ОТС, использование иных систем нецелесообразно ввиду их сложности и высокого уровня автоматизации.

Значительные преимущества (возможность длительного хранения, простота эксплуатации и др.) представляет способ хранения кислорода в химически связанном состоянии. Наиболее широкое применение получила надперекись калия [1], положенная в основу систем обеспечения газового состава на кораблях «Восток» и «Восход» (рисунок 2).

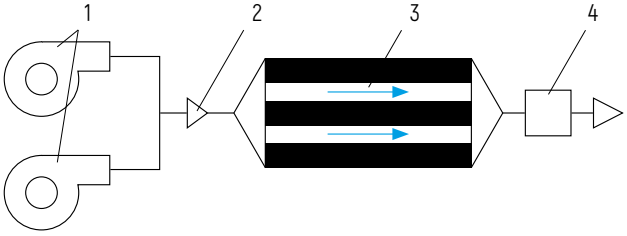


Рисунок 2 – Схема системы обеспечения газового состава атмосферы (на основе запасов KO_2): 1 – всасывающий вентилятор; 2 – распределительный клапан; 3 – поглотительный патрон с KO_2; 4 – угольный фильтр

Реакция по очистке атмосферы проходит в две стадии: в первой надперекись калия (рисунок 3) реагирует с парами воды, присутствующими в атмосфере отсека, при этом выделяется кислород. Вторая стадия – поглощение углекислого газа с выделением кислорода. Для того чтобы определить количество вещества, необходимого на борту пассажирского модуля, прежде всего следует рассчитать количество кислорода на человека в сутки. Исходя из среднесуточной потребности, равной 0,9 кг/чел, получаем, что, например, для 100 пассажиров понадобится 90 кг/сут. Килограмм надперекиси калия может поглотить 0,309 кг CO_2 с выделением 0,338 кг O_2. Таким образом, масса KO_2 для суточного потребления кислорода (с пятикратным запасом) для 100 человек составит 266 кг, что при его насыпной плотности 2158 кг/м^3 потребует объёма в 123 л.

Рисунок 3 – Кристаллы надперекиси калия

Система водообеспечения

В зависимости от длительности подъёма пассажирского модуля ОТС на борту в том или ином объёме должна присутствовать система водообеспечения пассажиров. На МКС имеются три источника воды: запасы (доставляются с Земли), а также вода, регенерируемая из конденсата атмосферной влаги и из урины. Вследствие относительно небольшого времени подъёма ОТС минимизируются источники получения воды из конденсата и урины. Таким образом, в пассажирском модуле вода будет храниться преимущественно в виде бортовых запасов.

Компоненты системы водообеспечения: резервуар для хранения питьевой воды; фильтр с активированным углём для поглощения привкусов и осуществления бактериальной очистки; насос для транспортировки воды из резервуара к точке потребления; клапан, защищающий систему от избыточного давления; датчик, контролирующий уровень воды в резервуаре.

Выбирая конструкцию и материал ёмкости для питьевой воды, за основу можно взять бак, используемый в космических летательных аппаратах «Восток» и «Восход», с корректировкой на особенности ОТС [1]. Устройство включает в себя металлический контейнер из пищевой нержавеющей стали с помещённой внутри эластичной оболочкой из специальной полиэтиленовой плёнки, которая не выделяет веществ, дающих привкус воде, и ограничивает в условиях невесомости объём, занимаемый водой (рисунок 4). Для надёжной герметичности полимерная оболочка изготавливается двухслойной.

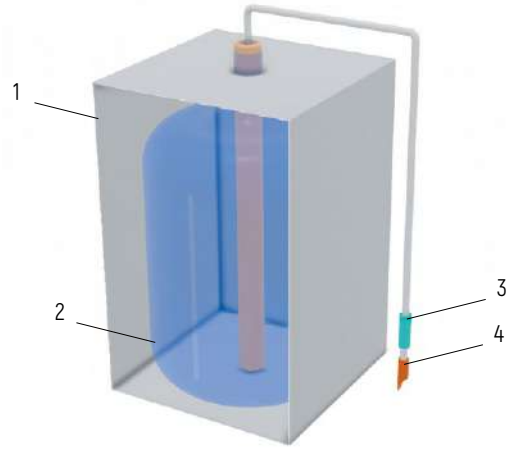


Рисунок 4 – Схема контейнера для питьевой воды:
1 – металлический контейнер; 2 – полимерная оболочка;
3 – фильтр с активированным углём; 4 – питьевой мундштук

Наиболее эффективным методом консервации воды и подавления микрофлоры является обработка ионами серебра в концентрации 0,1 мг/л.

В соответствии с нормами расхода воды на одного пассажира по ОСТ 54-3-62-93 [2] требуется 0,79 л/чел при продолжительности полёта 2 ч. Вместимость пассажирского модуля – до 100 человек. Следовательно, количество перевозимой воды при длительности полёта 5 ч должно составлять до 200 л. В целях поддержания жизнеобеспечения пассажиров при чрезвычайных и иных нештатных ситуациях минимальное количество воды необходимо увеличить. Таким образом, пассажирский модуль ОТС должен иметь на борту 950 л питьевой воды в расчёте на 100 потребителей на период до 24 ч.

Система контроля температуры и влажности газовой среды

Рассматриваемая система отвечает за циркуляцию воздуха и управление уровнем влажности для предотвращения конденсации и роста микроорганизмов. Вместе с общей системой терморегулирования она должна осуществлять отвод из модуля выделяемых пассажирами тепла (≈ 145 Вт/чел) и паров воды (≈ 50 г/чел/ч), а также поддерживать заданную температуру (20–24 °С), относительную влажность (30–70 %) и циркуляцию воздуха (0,1–0,4 м^3/с) [3].

В невесомости естественная конвекция не работает, поэтому требуется принудительная циркуляция воздуха, которая выполняется вентиляторами, обеспечивающими движение воздуха по объёму модуля [4].

На борту ОТС должна быть установлена система климат-контроля. При этом необходимо учитывать особенности пассажирского модуля, а именно невозможность естественного воздухообмена извне. Схожие условия эксплуатации у подводных лодок.

Алгоритм действия данных систем: забор воздуха из жилых и технических помещений; фильтрация от пыли и загрязнений; регулировка температуры посредством теплообменника; регулировка влажности через осушитель/испаритель; подача очищенного и кондиционированного воздуха обратно в отсеки. При этом должны присутствовать системы мониторинга, которые имеют датчики влажности и температуры.

Воздух не заменяется, а перерабатывается в пределах замкнутой системы, полностью обновляясь при нахождении пассажирского модуля ОТС на Земле.

Мощность климатической установки при объёме модуля 200 м^3 и количестве пассажиров 100 человек равна 64 кВт (коэффициент запаса – 1,2).

Система регулирования давления

Система регулирования давления отвечает за поддержание общего давления в отсеке в заданных пределах. Её функционал: сброс избыточного давления, угрожающего прочности герметичной оболочки модуля ОТС; контроль герметичности и компенсация утечек атмосферы в наружное пространство; наддув пассажирского отсека воздухом или кислородом в аварийных ситуациях. Регулирование давления в модуле обеспечивается клапанами выравнивания и сбрасывания давления.

Данная система должна поддерживать общее давление атмосферы 734–770 мм рт. ст., обусловленное в первую очередь физиологией человека, а также прочностными характеристиками несущей конструкции модуля, сохранять парциальное давление паров воды (влажность) в диапазоне от 6 до 8 мм рт. ст., осуществлять контроль герметичности отсека и компенсацию утечек воздуха из отсека.

Сброс давления выполняется клапаном избыточного давления, компенсация постоянных малых утечек производится нагнетанием из ресиверов со сжатым воздухом через распределительный клапан и дроссель по показаниям датчика абсолютного давления атмосферы (рисунок 5).

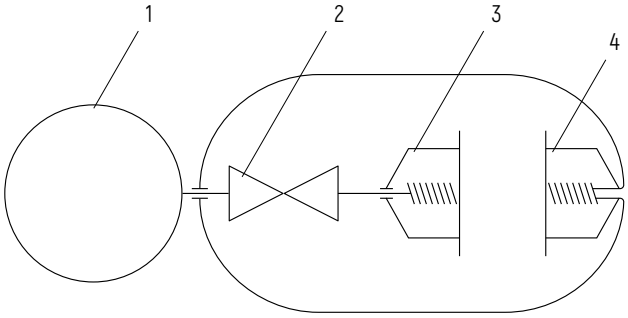


Рисунок 5 – Схема системы регулирования давления:
1 – ресивер со сжатым воздухом;
2 – распределительный клапан;
3 – датчик абсолютного давления атмосферы;
4 – клапан избыточного давления

Барометрическое устройство для определения скорости изменения давления атмосферы может представлять собой камеру, разделённую мембраной на две полости: одна открыта в атмосферу отсека, другая сообщена с атмосферой через дросселирующий капилляр – клапан аварийного наддува отсека.

Система удаления отходов жизнедеятельности

Система удаления отходов предназначена для обеспечения сбора и изоляции от атмосферы жидких и твёрдых продуктов жизнедеятельности в условиях изменяемого положения модуля в пространстве во время подъёма, спуска и стыковки.

При разработке данной системы следует учитывать ряд особенностей: условия ограниченного пространства, высокую плотность размещения пассажиров, длительность полёта. В качестве основы можно рассмотреть подобные системы на МКС и в гражданской авиации.

Система должна быть замкнутого типа (рисунок 6).

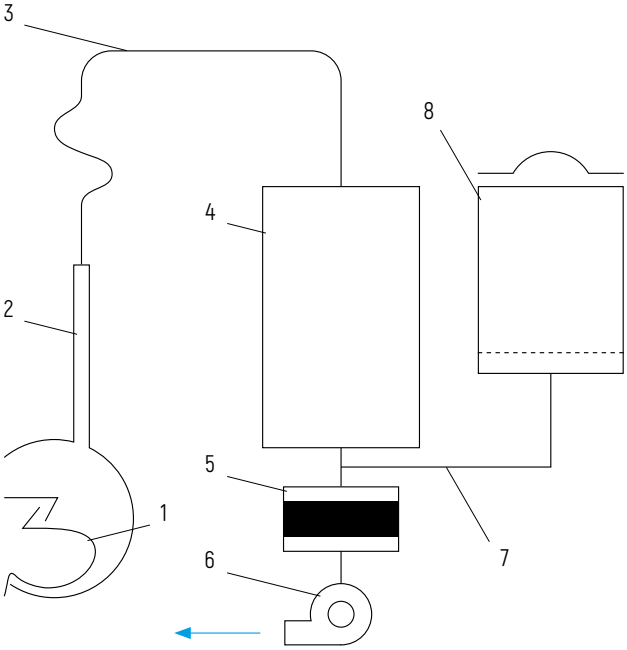


Рисунок 6 – Схема устройства
для сбора и изоляции отходов жизнедеятельности:
1 – вкладыш для сбора твёрдых отходов; 2 – приёмник отходов;
3 – гибкий шланг для транспортировки урины;
4 – сборник урины с влагопоглощающим материалом;
5 – фильтр с активированным углём для поглощения запахов;
6 – вентилятор; 7 – вентиляционный отсос;
8 – контейнер для сбора твёрдых отходов

Предпочтительно вакуумное удаление отходов с разделением жидких и твёрдых фракций, их ультрафильтрацией и последующей переработкой в воду и удобрения. Система должна функционировать автономно, быть герметичной, предотвращать распространение запахов и иметь высокий уровень санитарной безопасности.

Недостатки такой системы – сложность конструкции и необходимость регулярного обслуживания ёмкостей. При этом объёмы резервуаров для жидких и твёрдых отходов будут равны 200 и 40 л соответственно (рассчитано из суточных потребностей человека).

Система электроснабжения и освещения

Источником электроснабжения являются тяговые электродвигатели ОТС и накопительные аккумуляторные батареи на случай нештатных ситуаций. Аккумуляторные батареи используются для накопления и хранения энергии, полученной от системы рекуперации электродвигателей ОТС. В систему электроснабжения также входят элементы распределения энергии: инверторы, трансформаторы и другие узлы, обеспечивающие стабильное напряжение и ток. Комплекс для управления энергией – контроллеры и компьютерные системы, которые управляют распределением энергии, переключением источников и мониторингом состояния системы электроснабжения [5]. На космических аппаратах широко применяется светодиодное (LED) освещение ввиду его высокой энергоэффективности, длительного срока службы и низкой тепловой эмиссии.

Аккумуляторы модуля накапливают энергию для нормального функционирования системы, являются вторичным источником питания при аварийных ситуациях. Количество и ёмкость аккумуляторных батарей должны соответствовать потребностям высокоэнергетического электрооборудования на борту модуля и компонентов, связанных с безопасностью, а также удовлетворять запросы пассажиров. В нештатных случаях аккумуляторы станут гарантом стабильной работы жизненно важных систем на протяжении суток.

Система электроснабжения на борту модуля состоит из электрических шин, которые распределяют питание к различным узлам и оборудованию. Автоматические выключатели обеспечивают защиту от перегрузок и коротких замыканий. Используются компьютеризированные системы для мониторинга и управления распределением электроэнергии.

Внутреннее освещение предполагает общее освещение, персональные светильники для пассажиров, аварийное освещение и освещение багажных полок. Аварийное освещение представляет собой путевые указатели: световые полосы вдоль проходов, подсветку табло «Выход» и обозначение аварийных выходов. Резервное питание осуществляется автономными аккумуляторами, которые включаются автоматически при отказе основного электропитания.

Система обнаружения и тушения возгорания

Пассажирский модуль ОТС по причине замкнутости среды должен быть оборудован многоступенчатыми средствами обнаружения и тушения возгорания. В модуле необходимо использовать несколько систем пожарообнаружения, различающихся принципом работы датчиков:

- датчик, реагирующий на прозрачность атмосферы (возникающий при пожаре дым вызывает срабатывание датчика и выдачу аварийного сигнала);
- датчик, реагирующий на наличие аэрозолей, образующихся при нагреве изоляции электрических проводов в случае короткого замыкания, что является предвестником пожара;
- датчик, реагирующий на повышение или превышение предельного значения температуры в контролируемом отсеке.

Пассажирский модуль должен быть оснащён как стационарными, так и переносными системами пожаротушения (рисунок 7).

Рисунок 7 – Огнетушитель космический ручной ОКР-1 и огнетушитель специальный переносной ОСП-4

Стационарная система включает в себя автоматические распылители и устройства подачи инертных газов (аргон, азот) или химических составов. Переносные системы – два типа жидкостных огнетушителей, отличающихся временем работы и используемым веществом (жидкость, пена) [3].

Для изолированных помещений (например, багажного отделения, технических шкафов), если они имеются в капсуле, а также для пассажирских зон должны быть предусмотрены системы обнаружения пожара и перегрева. Для технических шкафов с высоким энергетическим уровнем необходимы системы пожаротушения. Следовательно, в комплекс средств противопожарной защиты должны входить пассивные (конструктивные мероприятия) и активные средства – собственно противопожарные системы.

Агрегаты и коммуникации компонуются таким образом, чтобы предотвратить возможность их воспламенения. Наиболее пожароопасные отсеки отделяются огнестойкими противопожарными перегородками. В конструкции применяются огнезащитные, трудновоспламеняемые и негорючие материалы.

Противопожарные системы отвечают за обнаружение очага пожара и его подавление. Выявление очага, подача светового и звукового сигналов и автоматическое включение средств пожаротушения – функции системы сигнализации о пожаре, датчики которой устанавливаются в наиболее пожароопасных отсеках (как правило, в отсеках основных и вспомогательных силовых установок). Физика процессов горения определяет способы борьбы с пожаром: снижение концентрации кислорода в очаге горения посредством использования нейтральных газов (обезвоженная углекислота, азот и др.); отвод тепла от очага горения с помощью веществ, вступающих с продуктами горения в химические реакции со значительным поглощением тепла, а также существенно понижающих температуру и ухудшающих условия горения.

Средства пожаротушения обеспечивают хранение и подачу огнегасящего состава в зону пожара. Широко применяются баллонные противопожарные системы – запас огнегасящего вещества в жидком или газообразном состоянии хранится в баллонах высокого давления. Для тушения пожара предусмотрены ручные переносные углекислотные огнетушители в разных концах пассажирского модуля.

Система защиты от радиации

Количественно воздействие радиации характеризуется величиной поглощённой энергии радиации в джоулях на 1 кг массы тела за единицу времени. Разовая доза в 1000 мДж/кг способна вызвать заболевание человека. В околоземном пространстве действует космическое излучение, дающее дозу 0,1 мДж/(кг-сут) под защитой магнитного поля Земли и до 0,35 мДж/(кг-сут) вне его. На высоте от 400 до 6000 км находится первый радиационный пояс Земли. В зависимости от расстояния получаемая здесь доза может колебаться от 200 до 1000 мДж/(кг-ч). В связи с этим орбиты пилотируемых полётов располагаются обычно на высоте около 300 км. Основная опасность исходит от периодических солнечных вспышек, которые могут дать дозу до 10 000 мДж/(кг-ч) [1]. Прогнозирование данного явления – одно из мероприятий по обеспечению радиационной безопасности.

Для того чтобы защитить пассажиров и оборудование на борту от вредного воздействия радиации, необходимо принять комплекс мер по снижению её влияния: использование многослойной обшивки модуля, применение специальных экранирующих материалов, в том числе полимерных и композитных, для создания физических барьеров, которые могут поглощать или рассеивать радиацию.

Корпус пассажирского модуля ОТС представляет собой многослойную конструкцию с толщиной стенки, достаточной для противостояния космическому мусору и нагреву [6]. Тем не менее внешняя оболочка обшивки должна быть усилена экранирующими материалами, стойкими к радиационному излучению (рисунок 8).

Для защиты от γ-излучения наиболее эффективны тяжёлые элементы, такие как свинец, ввиду их высокой плотности. Например, γ-излучение от цезия-137 свинец ослабляет в два раза на каждые 5 мм своей толщины; β-излучение полностью поглощается слоем воды толщиной 2 мм (коэффициент поглощения 0,98) или алюминия 0,6 мм. Для того чтобы полностью нейтрализовать излучение стронция-90, нужно менее 1,5 мм свинца, но для поглощения образовавшегося при этом рентгеновского излучения требуется ещё сантиметр данного металла. Листом бумаги можно задержать α-излучение, а для защиты от η-излучения подходят богатые водородом вещества, например полимеры.

Простейшим решением для защиты пассажиров и оборудования является использование пассивных экранов, изготовленных из традиционно применяемых для этих целей алюминиевых сплавов. Однако опыт показывает, что в отношении высокоэнергетических заряженных частиц такие панели малоэффективны из-за недостаточной толщины, а с увеличением массы экрана возрастает вероятность рождения в нём вторичных частиц. В настоящее время в качестве перспективных материалов для создания пассивных систем радиационной защиты рассматриваются различные полимерные водородосодержащие композиты [7], обладающие более высокими, чем алюминий, радиационно-защитными характеристиками при меньшей массе.

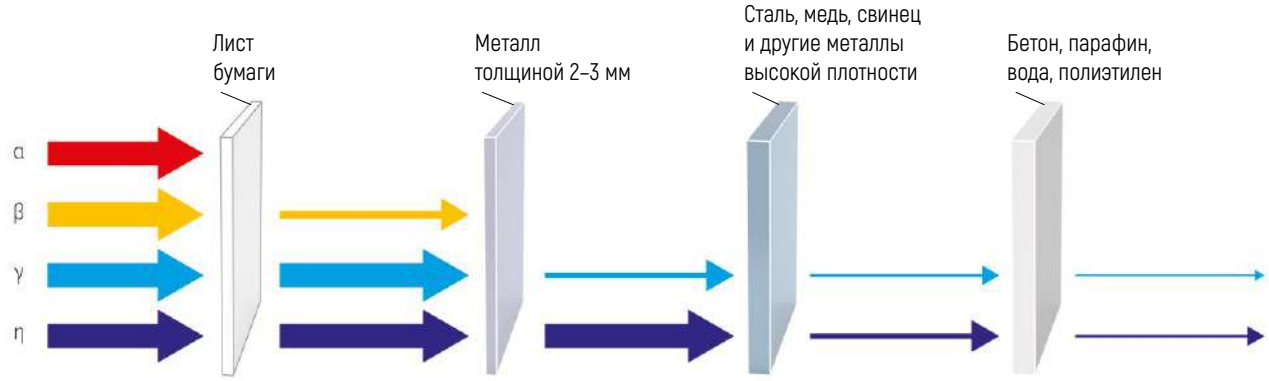


Рисунок 8 – Проникающая способность ионизирующих излучений

Информационно-развлекательная система

Система информирования и развлечений предназначена для комфортного времяпрепровождения пассажиров. Она позволяет прослушивать аудио, просматривать видео, отображает сведения о маршруте, обеспечивает связь, визуальное оповещение и др.

Перечень оборудования, входящего в данную систему:

- пульты индивидуального обслуживания пассажиров;
- Wi-Fi-модем с доступом в интернет;
- медиастанция;
- ЖК-монитор;
- индивидуальные мониторы;
- беспроводные наушники;
- розетки USB.

Внутри пассажирского салона предусмотрены комфортабельные кресла с регулировкой угла наклона спинки, оснащённые удерживающими устройствами. В подлокотниках кресел размещены пульты индивидуального обслуживания пассажиров, позволяющие управлять освещением, выбором канала на наушники и др. На каждом посадочном месте имеется розетка USB для подзарядки гаджетов. В спинки кресел вмонтированы индивидуальные мониторы с диагональю 8–10 дюймов. В салоне установлены Wi-Fi-модем с доступом в интернет и центральный ЖК-монитор размером минимум 20 дюймов с выводом визуальной и акустической информации для пассажиров.

Компоновка салона пассажирского модуля ОТС

Рассмотрим вариант компоновки внутреннего пространства пассажирского модуля ОТС на 100 посадочных мест.

Пассажирский модуль ОТС представляет собой герметичную цилиндрическую капсулу [8]. В процессе подъёма он изменяет ориентацию в пространстве, что позволяет обеспечивать оптимальное распределение нагрузок и комфортное положение пассажиров в различных фазах движения, таких как разгон, стабилизация, выход на орбиту, стыковка. Плавное ускорение реализуется за счёт контролируемого нарастания тяги, что предотвращает резкие перегрузки. Система стабилизации положения модуля в пространстве активируется при подлёте к КИО «Орбита». Это необходимо для точного позиционирования модуля относительно стыковочного шлюза и безопасной высадки пассажиров.

Внешний облик пассажирского модуля отображён на рисунке 9. Объём капсулы можно разделить на четыре функциональные зоны: пассажирский отсек, отсек с оборудованием СЖО и дублирующий его отсек, пространство для коммуникаций.

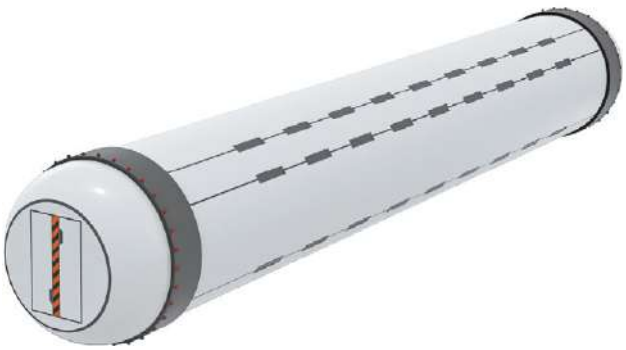


Рисунок 9 – Общий вид пассажирского модуля (вариант)

Пассажирский отсек (рисунок 10) имеет длину 21 м и внутренний диаметр 2,5–3,5 м; включает в себя отсеки для ручной клади, размещённые под потолком, а также отсеки и ниши для прокладки коммуникаций (электропроводка, силовые кабели, воздуховоды и каналы систем климат-контроля, пожаротушения и освещения).

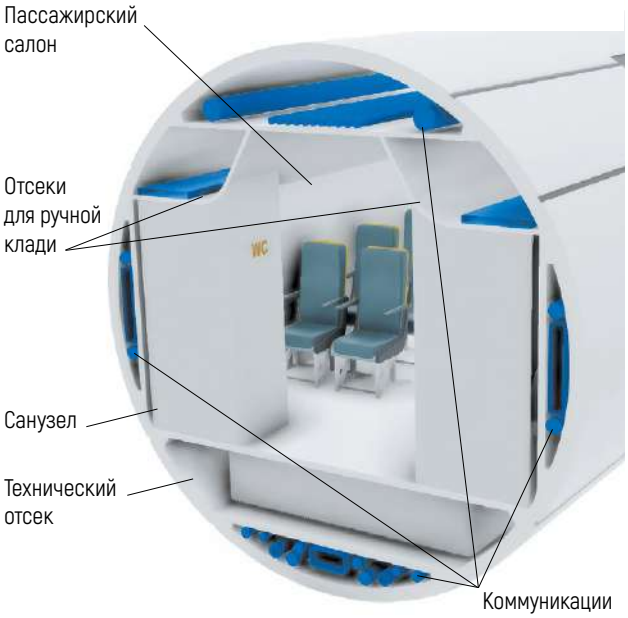


Рисунок 10 – Компоновочное решение пассажирского отсека (вариант)

Отсек с оборудованием СЖО (рисунок 11) отделён от пассажирского отсека шумо- и вибростойкой перегородкой. С противоположной стороны модуля расположен отсек, дублирующий все узлы СЖО, на случай нештатной ситуации для обеспечения безопасного нахождения пассажиров в модуле ОТС.

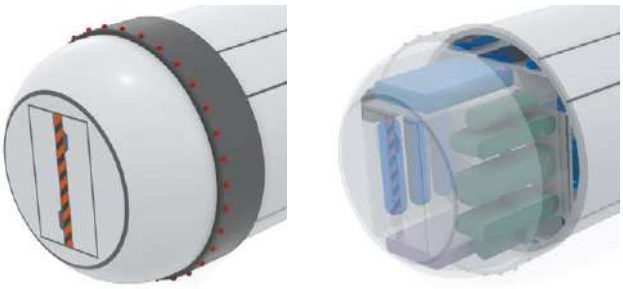
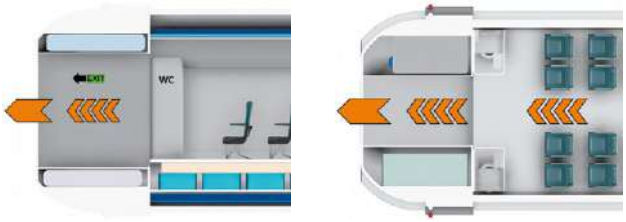


Рисунок 11 – Отсек с оборудованием СЖО (вариант)

Выход выполняется через торец модуля: подобная компоновка позволяет быстро и упорядоченно осуществить вход/выход/эвакуацию пассажиров, а также даёт возможность герметичного соединения со стыковочными шлюзами на орбите (рисунки 12, 13).

Рисунок 12 – Выход из модуля через отсек с оборудованием (вариант)



а) б)

Рисунок 13 – Направление выхода пассажиров из модуля (вариант): а – вид сбоку; б – вид сверху

Конструкция модуля обеспечивает жёсткость и прочность, является многоразовой и экономичной. В случае выхода из строя одного из элементов сохраняется работоспособность всей системы, что достигается дублированием и резервированием. На наружной обшивке установлены световые сигнальные и габаритные огни. Конструкция модуля устойчива к воздействию микрометеоритов, террористическим актам и вандализму.

Заключение

В статье рассмотрена важность использования современных технологий и оборудования для освоения космического пространства. Особое внимание уделено СЖО как ключевому элементу безопасности пассажиров ОТС.

Определён состав данной системы, её характеристики, а также предъявляемые к ней основные требования. Разработан вариант компоновки пассажирского модуля ОТС. Главные факторы, влияющие на наличие и объём узлов СЖО в ограниченных условиях: количество пассажиров, продолжительность их пребывания в модуле, внешние воздействия и безопасность.

Дальнейшие исследования будут направлены на детализацию СЖО, применяемых в пассажирских модулях ОТС, с целью оптимизации состава и компоновки для безопасного и комфортного пребывания людей в космическом пространстве. Вместе с тем при проектировании модуля необходимо учитывать как требуемую мощность энергообеспечения, так и рациональное распределение внутреннего объёма, достаточного для размещения оборудования и поддержания жизнедеятельности пассажиров.

Список основных источников

1. *Серебряков, В.Н. Основы проектирования систем жизнеобеспечения экипажа космических летательных аппаратов: учеб. пособие / В.Н. Серебряков. – М.: Машиностроение, 1983. – 160 с.*
2. *Компоновка пассажирской кабины гражданских воздушных судов. Пассажирское, бытовое и вспомогательное оборудование. Общие технические требования: ОСТ 54-3-62-93. – Введ. 01.03.1994. – М.: Федерал. авиац. служба России, 1996. – 12 с.*
3. *Некоторые подходы к созданию и модернизации системы жизнеобеспечения отечественных орбитальных станций и особенности подготовки космонавтов к их эксплуатации / Д.К. Дедков, А.П. Коровкин, Т.Ю. Маликова, А.А. Тощева // Пилотируемые полёты в космос. – 2022. – № 1 (42). – С. 70–85.*
4. *Воронин, Г.И. Системы кондиционирования воздуха на летательных аппаратах: учеб. / Г.И. Воронин. – М.: Машиностроение, 1973. – 444 с.*
5. *Кузьмина, Н.А. Система энергосбережения космического аппарата / Н.А. Кузьмина // Решетнёвские чтения. – 2017. – № 21-1. – С. 274–276.*
6. *Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск: СтройМедиаПроект, 2024. – 492 с.*
7. *Полимерные композиты для создания высокоэффективных систем радиационной защиты космических аппаратов / Н.П. Чирская, Е.Н. Воронина, В.Н. Милеев [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2011. – № 4. – С. 20–24.*
8. *Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А.Э. Юницкий. – Силакрогс: ПНБ принт, 2019. – 576 с.*

УДК 629.7+007.5

Биосферные системы жизнеобеспечения человека в ЭкоКосмоДоме

А.Э. Юницкий[1, 2]
доктор философии транспорта

К.С. Дубовик[2]

Н.С. Зыль[2]

[1] ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

[2] ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

Рассмотрены технические решения, которые могут использоваться в качестве вспомогательных и резервных для экосистемы замкнутого типа. Преимущественно они применяются в технологических процессах, выполняемых вне биосферы ЭкоКосмоДома (ЭКД). Определены наиболее перспективные подходы для адаптации в проекте ЭКД. Предложены возможные варианты минимизации ресурсо- и энергопотребления.

Цель настоящей работы – поиск совокупности надёжных, эффективных и безопасных технических решений, внедряемых в основную биосферную систему ЭКД и его производственную составляющую и не нарушающих концепцию автономной экосистемы биосферного типа.

Новизна исследования заключается в том, что техническая часть биологической системы жизнеобеспечения, базирующаяся на физико-химических процессах, интегрируется в биосферу ЭКД и рассматривается в качестве вспомогательной и резервной систем. Таким образом, биосфера внутри ЭКД существует самостоятельно, но при этом имеется возможность выполнения необходимых технологических процессов и реализуется вариант устойчивой экосистемы биосферного типа с элементами технических решений.

Представлены функции компонентов замкнутых экосистем, которые могут быть задействованы в технологических процессах, примеры оборудования, применяемого для систем жизнеобеспечения на орбитальных станциях, описаны порядок и принципы его работы, приведены основные характеристики и используемые материалы.

Предложенная концепция технических решений может быть актуальна при проектировании инженерных систем объекта «ЭкоКосмоДом».

Ключевые слова:
биорегенерация, биосферная экосистема, замкнутая экосистема, космос, переработка воды, регенерация воздуха, система жизнеобеспечения, ЭкоКосмоДом (ЭКД).

UDC 629.7+007.5

Biospheric Life Support Systems for Humans in EcoCosmoHouse

A. Unitsky[1, 2]
Dr. of Philosophy
in Information Technologies
(Transport)

K. Dubovik[2]

N. Zyl[2]

[1] Astroengineering Technologies LLC,
Minsk, Belarus

[2] Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

The article considers technical solutions auxiliary and backup systems for a closed ecosystem. They are mainly applied in technological processes performed outside the biosphere of the EcoCosmoHouse (ECH). The authors identify the most promising approaches for adaptation in the ECH project and possible ways to minimize resource and energy consumption.

The aim of this work is to search for a combination of reliable, efficient, and secure technical solutions implemented in the main biospheric system of the ECH and its production component, without violating the concept of an autonomous biospheric ecosystem.

The novelty of the study lies in the fact that the technical part of the biological life support system, based on physicochemical processes, is integrated into the biosphere of the ECH and considered as an auxiliary and backup system. Thus, the biosphere inside the ECH functions independently while maintaining the ability to perform necessary technological processes, resulting in a sustainable biospheric ecosystem enhanced with technical elements.

The article presents the functions of the components of closed ecosystems that can be involved in technological processes, examples of existing life support equipment used in orbital stations, describes the order and principle of its operation, and provides the main characteristics and consumables used.

The proposed life support concept can be relevant in the design of engineering systems for the ECH.

Keywords:
air regeneration,
bioregeneration,
biospheric ecosystem,
closed ecosystem,
EcoCosmoHouse (ECH),
life support system,
space, water recycling.

Введение

С первыми попытками освоения человеком космоса встал вопрос о разработке систем жизнеобеспечения (СЖО) замкнутого цикла, способных при весьма ограниченных ресурсах создавать и поддерживать комфортные и безопасные условия в невесомости, восстанавливать атмосферу, делая её пригодной для дыхания в течение длительного периода.

В настоящее время СЖО орбитальных станций, например МКС «Мир», преимущественно основаны на физико-химических процессах. Такие системы проще контролировать, они предсказуемы, однако имеют недостатки: неполную замкнутость цикла и низкую надёжность ввиду ограниченного ресурса компонентов.

В частности, система регенерации воды обеспечивает почти 85 % необходимого объёма, а кислорода – около 75 % [1]. Кроме того, образуются свободный водород и углекислый газ, которые на практике сбрасываются в открытый космос. Восполнение кислорода осуществляется с помощью электролиза воды, для чего нужно постоянно доставлять её с Земли.

В связи с этим усилия учёных направлены на поиски способов повторного задействования углекислого газа в процессе восстановления воды и кислорода, например с использованием реакций Сабатье или Боша – Будуара, что позволило бы создать замкнутый цикл.

Длительное пребывание людей в космосе требует наличия автономных систем, где есть все необходимые составляющие, а ресурсы циркулируют естественным образом [2]. Такие замкнутые или частично замкнутые СЖО призваны обеспечить человека комфортными для жизни атмосферой, микроклиматом, искусственной гравитацией, питьевой водой, пищей. Вместе с тем должна быть организована утилизация отходов, предполагающая внедрение передовых технологий.

Биосферные системы, отвечающие данным требованиям, сегодня разрабатываются специалистами ЗАО «Струнные технологии» (г. Минск, Беларусь) [3]. Для реализации этих решений используется именно биосферный подход, поскольку долгосрочное поддержание техногенной СЖО практически невозможно ввиду ограниченности ресурса оборудования.

На основании вышеизложенного цель настоящего исследования заключается в поиске технических решений, которые могут, с одной стороны, обеспечивать технологические процессы в ЭкоКосмоДоме (ЭКД), а с другой – находиться в балансе и при необходимости дополнять существующие биосферные решения его замкнутой экосистемы.

Система жизнеобеспечения в рамках проекта «ЭкоКосмоДом»

Человек способен прожить без пищи около месяца, без воды – не более недели, а без воздуха – всего несколько минут. Именно поэтому важно поддерживать стабильный газовый состав атмосферы, оптимальную температуру и влажность. Эти факторы значимы не только для здоровья людей, но и для устойчивого функционирования всей биосферной среды в замкнутом пространстве. Таким образом, в ЭКД [4, 5] необходимо:

- поддерживать уровень кислорода;
- удалять лишний углекислый газ;
- контролировать вредные примеси (метан, аммиак и др.);
- регулировать температуру и влажность;
- поддерживать оптимальное давление.

Эффективно и комплексно достичь этих целей можно только при помощи биосферных технологий, которые обеспечивают реализацию естественных процессов саморегуляции природных экосистем. В отличие от традиционных технических СЖО, требующих больших энергозатрат и сложного трудоёмкого обслуживания, биосферные решения используют живые организмы – растения, микроорганизмы, водоросли, грибы – для поддержания газового баланса, очистки воздуха, утилизации отходов и регулирования влажности, как это и происходит в биосфере нашей планеты в течение миллионов лет.

Например, фитофильтрация с помощью высших растений, микроводорослей, фотосинтезирующих бактерий позволяет не только поглощать избыточный углекислый газ и выделять кислород, но и преобразовывать различные примеси внутри жилого объёма, а замкнутые микробные циклы способны перерабатывать органические отходы в питательные вещества для новых звеньев экосистемы.

Следовательно, применение биосферных технологий создаёт устойчивую, самовосстанавливающуюся среду, являющуюся природной, что особенно важно для долгосрочного пребывания человека в условиях замкнутой экосистемы ЭКД.

Принципиальная схема предложенной концепции приведена на рисунке 1.

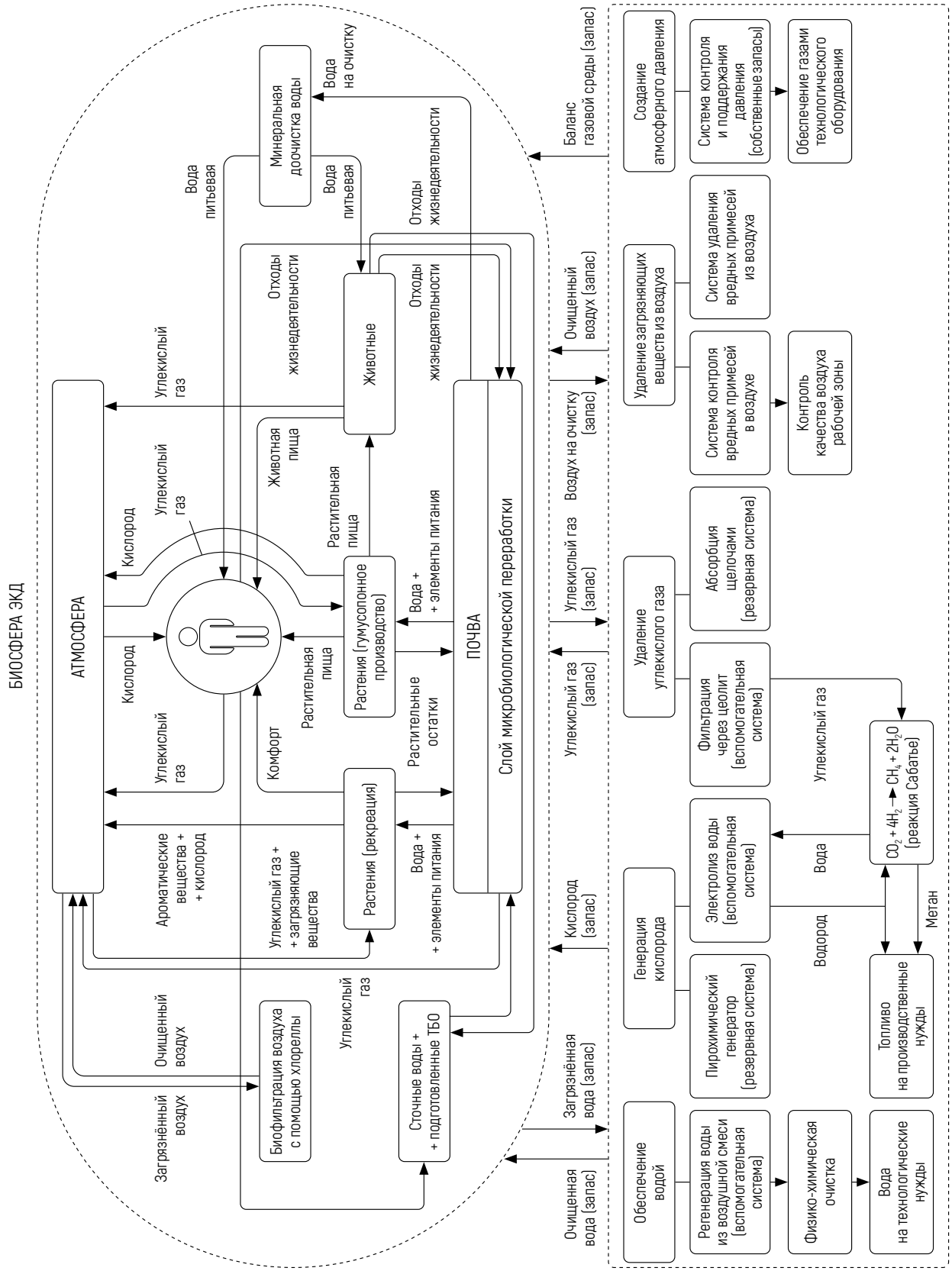


Рисунок 1 – Принципиальная схема интеграции технологических решений с биосферой ЭКД

Система поддержания уровня кислорода и углекислого газа

Природная система генерации кислорода и улавливания углекислого газа (основная). Главной составляющей атмосферного воздуха, необходимой для дыхания человека, является кислород (O_2). Эталоном считается его содержание в воздухе не менее 21 % от общего объёма. В среднем человек массой 70 кг потребляет 0,5–1 кг кислорода в сутки [6]. При этом выдыхаемый воздух содержит до 16 % кислорода, т. е. его безвозвратные потери (около 5 %) следует восполнить [7]. В отличие от существующих орбитальных станций, где приоритетный способ получения кислорода – электролиз воды [8], в ЭКД для полного обеспечения живых организмов кислородом планируется реализовать в качестве основной биорегенеративную (природную) систему, которая одновременно поглощает углекислый газ и генерирует кислород [1, 9, 10]. Она предполагает необходимое для этого количество растений и наличие двух зон их выращивания [11]: рекреационной и зоны интенсивного производства.

В рекреационной зоне концентрация CO_2 будет поддерживаться на уровне 300–1000 ppm. В ней предусматривается высокое содержание кислорода и относительно низкое – углекислого газа. Здесь планируется выращивать декоративные и лекарственные растения, обеспечивающие эстетическое удовольствие и рекреацию, что создаёт комфортные условия для жизни. Предполагается также высадка плодово-ягодных и овощных культур [12].

Зона интенсивного сельскохозяйственного производства с концентрацией CO_2 2000–4000 ppm предназначена для культивирования специализированными способами (например, гумусопоника на основе эликсира плодородия uTerra [13]) растительной продукции в больших объёмах с использованием перспективных технологий (например, вспененных питательных растворов, лёгких почвогрунтов на основе перлита и др.), соответствующих материалов и оборудования.

В случае нехватки кислорода и/или при необходимости выполнения технологических процессов горения возможно применение вспомогательных систем восполнения кислорода, базирующихся на физико-химических процессах.

Применение хлореллы и диатомовых водорослей для биофильтрации и регенерации кислорода (вспомогательные системы). Хлорелла (*Chlorella vulgaris*) и диатомовые водоросли (*Diatomeae*) – эффективные биологические компоненты для поддержания газового баланса в замкнутых экосистемах. В процессе фотосинтеза водоросли поглощают углекислый газ и выделяют кислород, демонстрируя продуктивность до 10–14 мг O_2/л/ч в оптимальных условиях. Особенно ценными хлорелла и диатомовые водоросли являются для космических станций и подводных систем, поскольку относительно неприхотливы: требуют только свет, воду и CO_2, а это в свою очередь снижает энергозатраты по сравнению с техническими аналогами.

Помимо регенерации кислорода водоросли выполняют дополнительные функции: хлорелла участвует в переработке органических отходов [14], а диатомовые водоросли стабилизируют водную среду, поглощая избыточный азот и фосфор. Их совместное культивирование в фотобиореакторах (с регулируемым освещением 450–740 нм и температурой 20–30 °C) способно повысить общую эффективность системы на 15–20 % [15]. Такие комбинированные решения обеспечивают не только газовый баланс, но и устойчивость замкнутых экосистем [16]. Кроме того, хлорелла может служить пищей для человека и кормом для животных и легко перерабатывается в биогумус, необходимый для круговорота живого вещества в замкнутой экосистеме биосферного типа.

Генерация кислорода на основе электролиза воды (вспомогательная система). Данная система построена на принципе электрохимического разложения воды на кислород и водород. Принципиальная схема электролиза приведена на рисунке 2.

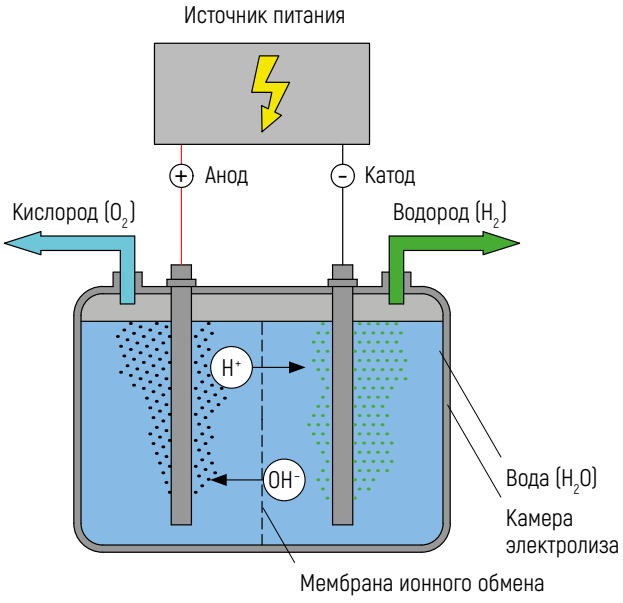


Рисунок 2 – Принципиальная схема электролиза

Принцип действия электролиза:

- вода (из системы регенерации) подаётся в электролизёр;
- под действием постоянного тока напряжением 28 В происходит разложение:

$$2H_2O \longrightarrow 2H_2\uparrow + O_2\uparrow \text{ [7].}$$

Кислород может расходоваться на технологические нужды или подаваться в жилые помещения, а водород выступает как сопутствующий продукт.

В качестве примеров стоит привести:

- систему «Электрон-ВМ» (Россия): производительность по кислороду 80–160 л/ч; используется жидкий щелочной электролит [7];
- систему Oxygen Generation System (США): требует высокой степени очистки, вода для электролиза должна иметь электропроводность до 1 мкСм/см (1 МОм/см); применяется твёрдый полимерный электролит [7].

Система, действующая на орбитальных станциях, не является замкнутой, поскольку водород сбрасывается в космос. Вместо этого его можно собирать и использовать:

- в технологических процессах высокотемпературной резки;
- в качестве энергоносителя для топливных элементов, а также в качестве топлива для жидкостных ракетных двигателей;
- как технологическое сырьё для гидридов интерметаллических соединений.

Следует отметить, что обращение с водородом сопряжено со сложностями ввиду его высокой взрывопожароопасности, что обуславливает необходимость применения специальной тары и приёмо-раздаточной системы.

Пирохимические генераторы кислорода (резервная система). Пирохимические генераторы [17] позволяют производить кислород при нагреве, а в более общем случае используемые в них вещества могут регенерировать кислород, одновременно поглощая углекислый газ. Действующий пример такой технологии – система «Воздух» (Россия).

В качестве твёрдого вещества обычно применяют смесь перхлората лития ($LiClO_4$) и надпероксида натрия (NaO_2). Для замкнутых экосистем целесообразно рассмотреть смесь надпероксидов калия (KO_2) и натрия (NaO_2) в соотношении 5 : 1 – 10 : 1.

При использовании данной смеси как компонента систем регенеративного типа (например, в скафандрах для выхода в открытый космос), а также как резервного источника кислорода (или для поглощения углекислого газа) продукты распада можно задействовать с целью регулирования минерального состава почвы.

К плюсам такой системы при длительных космических миссиях относится возможность регенерации содержимого пирохимических генераторов.

Система удаления углекислого газа

Существует заблуждение о том, что духота возникает из-за недостатка кислорода в воздухе, но на самом деле это не совсем так: она вызвана повышением содержания углекислого газа, который образуется при дыхании человека, аэробной переработке отходов и иных процессах в экосистеме. Данное явление приводит не только к психологическому дискомфорту, но также к физиологическим изменениям: возникает головная боль, повышается артериальное давление, усиливается глубина и частота дыхания. В связи с этим удаление диоксида углерода из воздуха становится не менее важной задачей, чем генерация кислорода.

Среднее содержание углекислого газа в свежем воздухе составляет около 0,04 % от общего объёма, или 400 ppm. Для сравнения: в офисных помещениях его уровень достигает 800–1000 ppm, а допустимым считается показатель до 1400 ppm.

Удаление углекислого газа в ЭКД предусматривается за счёт биорегенеративной системы посредством поглощения CO_2 растениями и водорослями в процессе фотосинтеза, для воспроизведения которого необходимы свет, вода и углекислый газ. В качестве источника света планируется использовать Солнце и специальные лампы с полным спектром излучения.

Для поглощения углекислого газа и его применения в технологических процессах или в случае внештатных ситуаций, связанных с переизбытком CO_2 в воздухе, можно задействовать вспомогательные и резервные системы, основанные на принципе сорбции (поглощения). При этом сорбированный углекислый газ используется для нужд электронной или химической промышленности, а также при необходимости накапливается для последующего применения в биосфере (создание карбонового буфера).

Адсорбция через фильтр (вспомогательная система). Принцип действия заключается в пропускании воздуха через сито, которое содержит гранулы специального материала – цеолита [18] (рисунок 3).

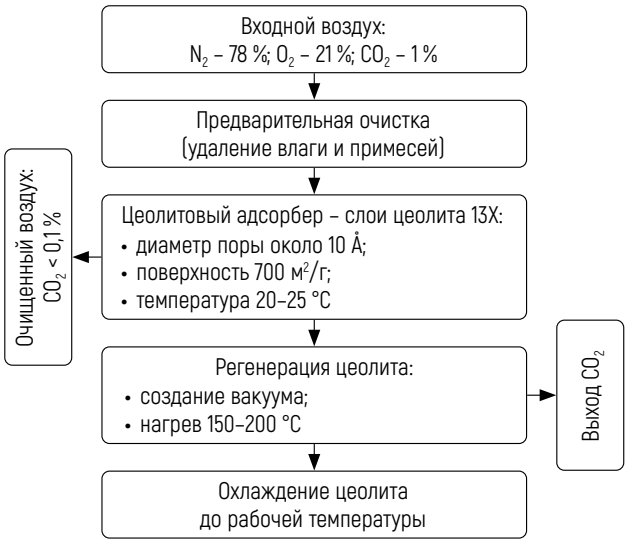


Рисунок 3 – Принципиальная схема удаления углекислого газа через молекулярный фильтр

Цеолит хорошо впитывает газ и влагу, его пропускная способность напрямую зависит от размера молекулы вещества. За счёт этой особенности углекислый газ поглощается, а азот и кислород проходят практически свободно (в среднем утрачивается до 5 % кислорода и до 15 % азота). В основном для очистки воздуха применяют синтетический цеолит NaX (13X). Для того чтобы материал не набирал влагу, воздух перед фильтрацией очищается от крупных частиц, осушается и охлаждается. В закрытом объёме камеры, где установлен фильтрующий элемент с адсорбентом, искусственно создаётся вакуум и увеличивается температура, за счёт чего высвобождается углекислый газ.

Данный способ позволяет удалять 92–95 % углекислого газа и использовать адсорбент многократно (ресурс цеолита достигает 50 000 циклов).

В качестве действующего примера можно привести систему Carbon Dioxide Removal Assembly (США).

Рассмотренная система обычно применяется как частично замкнутая, поскольку повторное использование высвободившегося углекислого газа не предусматривается. В то же время в ЭКД его целесообразно направить в зону интенсивного производства растительной продукции для участия в процессе фотосинтеза, где предельно допустимая концентрация (ПДК) диоксида углерода в воздухе рабочей зоны выше, чем в жилых помещениях [11].

Абсорбция с помощью картриджей (резервная система). Удаление углекислого газа с помощью картриджей позволяет поддерживать оптимальный состав воздушной смеси в случае неисправности системы, функционирующей по принципу адсорбции через молекулярное сито.

Химическая абсорбция основана на взаимодействии диоксида углерода преимущественно с соединениями щелочного характера [19].

В качестве абсорбента (поглотителя) распространено применение гидроксида лития, но целесообразнее использовать соединение калия (KOH), поскольку полученные продукты проще при необходимости задействовать для регулирования минерального состава гумусопонных систем. В данном процессе 1 кг гидроксида калия поглощает около 0,4 кг углекислого газа по реакции:

$$2KOH + CO_2 \longrightarrow K_2CO_3 + H_2O.$$

Преимуществом такого способа является возможность повторного применения абсорбента (при электрохимической регенерации) и использования его для подкормки растений, в том числе для локального раскисления почвы.

Система контроля и удаления вредных примесей

Вдыхание загрязнённого воздуха может со временем негативно отражаться на здоровье человека. Это проявляется в разных формах: от головной боли и нарушения нормальной функции органов дыхания до развития тяжёлых заболеваний или даже смертельного исхода. Перечень основных загрязнителей [20] приведён в таблице 1.

Таблица 1 – Основные загрязнители воздуха

Вещество	ПДК, мкг/м³* (максимальная разовая)	Источник
Аммиак (NH_3)	200	Моча, пот, разложение отходов
Метан (CH_4)	5×10^4	Метаболизм
Сероводород (H_2S)	8	Биологические отходы
Формальдегид (CH_2O)	30	Полимеры
Твёрдые частицы (недифференцированная по составу пыль/аэрозоль)	300	Органические и неорганические продукты распада

* Значения ПДК приняты аналогично значениям загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населённых пунктов и мест массового отдыха населения [21].

Загрязняющие вещества представлены в виде твёрдых частиц, химических элементов и их соединений, поэтому мониторинг и удаление следует выполнять комплексно. Нужна система контроля, способная одновременно распознавать несколько загрязнителей, а система очистки воздуха от загрязняющих веществ должна быть биосферной и опираться на биотехнологические методы. При необходимости очистки воздуха для технологических процессов могут применяться механические и химические методы.

Система контроля. Одним из наиболее эффективных и информативных способов анализа состава воздуха является лазерная абсорбционная спектроскопия [22]. В её основе лежит совокупность методов аналитической спектроскопии, базирующихся на взаимодействии лазерного излучения с исследуемым веществом. Лазерная абсорбционная спектроскопия использует перестраиваемые диодные лазеры, обладающие малой шириной линии излучения (не более 30 МГц).

Достоинство данного способа – одновременный анализ большого количества соединений. В качестве действующего примера можно привести систему ANITA (США).

Система очистки. Основной способ очистки воздуха в замкнутой экосистеме – это комбинация естественных биологических процессов. Очистка осуществляется растениями, задерживающими загрязняющие вещества на листьях, водорослями, а также при прохождении воздуха через водяной туман, который осаждает пыль, аэрозоли и частично растворяет газы.

Вода с примесями поступает в слой почвы с микроорганизмами, где они проводят переработку, а после отправляется на очистку и обогащение в минеральной загрузке, где фильтруется и снова используется.

Особую роль играют растения. Они поглощают углекислый газ, летучие органические соединения и другие загрязнители, преобразуя их в кислород и биомассу. Почвенные микроорганизмы разлагают органические остатки, превращая их в питательные вещества, которые возвращаются в экосистему.

Очистка воздуха для технологических нужд, одновременно являющаяся резервной, представляет собой многоуровневую систему, работа которой основана на сорбционно-каталитических процессах. Для предварительной очистки от пылевых частиц применяется сетчатый фильтр с отверстиями размером 5 мкм, далее проводится сорбционная очистка активированным углём, затем выполняется каталитическое разложение формальдегида и других органических соединений при 200 °C, после чего происходит окончательная очистка с помощью HEPA-фильтров. В качестве действующего примера можно привести российскую систему БМП (блок очистки от механических примесей).

Система регулирования давления (регенерация азота)

Атмосферное давление оказывает воздействие на человека. Суммарное давление газов, растворённых в тканях и жидких средах организма (кровь, лимфа и др.) или заполняющих полые органы (лёгкие, желудок, кишечник и др.), близко по значению к атмосферному. При резком понижении внешнего давления возникают так называемые декомпрессионные расстройства, которые приводят к необратимым изменениям в жидкостях, тканях и органах. Оптимальным атмосферным давлением для человеческого организма является (752 ± 10) мм рт. ст.

В состав естественного атмосферного воздуха помимо прочих компонентов входит азот (N_2). Его содержание достигает 79 %, т. е. превышает 2/3 объёма. При этом азот напрямую не вовлечён в процесс дыхания и человеком не используется, но с физиологической точки зрения нельзя постоянно дышать чистым кислородом. Кроме того, высокое содержание кислорода в воздухе пожароопасно.

Атмосферный азот инертен из-за тройной ковалентной связи между атомами. Только некоторые бактерии и археи способны расщеплять её.

Дыхательная система млекопитающих выделяет небольшое количество азота. Так, в выдыхаемом человеком воздухе содержание этого вещества доходит до 79,7 % объёма, при начальном значении 79 %. В условиях работы биорегенеративной системы по регулированию состава атмосферы структура воздушной смеси по азоту не претерпевает кардинальных изменений, однако при очистке воздуха от углекислого газа через цеолитовый фильтр утрачивается около 5 % кислорода и до 15 % азота. Если с задачей восполнения кислорода можно справиться с помощью биорегенеративной системы, то синтез азота в открытом космосе затруднён и ограничен. Существуют перспективные направления по добыче этого вещества (например, генерация из атмосферы планеты Марс), но его содержание в данном случае ничтожно мало (менее 3 % от объёма), поэтому такой способ будет нерентабельным [23]. Вторая проблема заключается в доставке исходных ресурсов к месту переработки, в связи с чем эти методы оправданы при относительной близости ЭКД к источникам добываемых веществ.

Наиболее эффективным и доступным путём пополнения воздушной смеси азотом может быть окисление азотсодержащей органики, например мочевины:

$$CO(NH_2)_2 + O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O + N_2.$$

Давление контролируется датчиками в автоматическом режиме (точность ±50 Па). Повышение давления выполняется путём подачи азота через клапаны из газового хранилища ЭКД. Для понижения давления осуществляется сброс избыточной воздушной смеси через шлюзы в космос. Подвижность воздушной смеси поддерживается работой вентиляторов.

Система обеспечения питьевой водой

Средняя потребность человека в чистой питьевой воде составляет около 2,5 л в сутки. В связи с этим чистая питьевая вода является второй в списке необходимых ресурсов после качественной атмосферы.

Природное водоснабжение (основная система). Основным источником пресной воды для ЭКД служит искусственный водоём глубиной до 6 м, конфигурация и габаритные размеры которого определяются из планировочных решений и числа проживающих. По всей площади ЭКД предусмотрена разветвлённая сеть искусственных каналов, которые берут своё начало из основного водоёма. Канал выполнен в виде двухуровневой системы: вода вытекает из водоёма, проходит по всей сети до места подъёма и с помощью лопастей водяной мельницы подаётся на второй уровень канала. Второй уровень предназначен для очистки воды природными методами (через минеральные фильтры и почву) и её возврата в основной водоём, где происходит последующая очистка воды и фильтрация водными обитателями и анаэробными микроорганизмами.

Генерация воды из воздушной смеси (вспомогательная система). В процессе жизнедеятельности человека и работы технологического оборудования в объём ЭКД выделяется влага. Целесообразно извлечение этой дистиллированной влаги из воздуха и её преобразование в техническую и питьевую воду [24].

Основные источники образования влаги в воздухе приведены в таблице 2.

Для получения осушенного воздуха он втягивается вентиляторами и пропускается через предварительный механический фильтр, который задерживает частицы пыли размером более 5 мкм. Далее на теплообменнике, имеющем температуру 2–4 °C, происходит охлаждение влаги с образованием конденсата. При этом антибактериальное покрытие теплообменника, включающее в себя частицы серебра и гидроксиапатита, уничтожает патогенные бактерии и микроорганизмы. Полученная из конденсата вода пропускается через угольные фильтры, которые задерживают загрязняющие взвешенные частицы. Затем путём ионного обмена с помощью адсорбирующих веществ вода очищается от органических и неорганических примесей, тем самым уменьшается её жёсткость.

Таблица 2 – Основные источники образования влаги в воздухе

Источник	Доля влаги, %
Суммарное испарение влаги с поверхностей почвы, растительности, водоёма и системы каналов	До 85 (в зависимости от размеров и площади поверхностей, с которых испаряется влага)
Дыхание и потоотделение людей и животных	До 45–55
Гигиенические процедуры	До 30–35
Охлаждение приборов, работа некоторого оборудования	До 15–20

Данный способ позволяет переработать до 93 % влаги из воздуха в воду.

В качестве действующих примеров можно привести системы СРВ-К2М (Россия) и Environmental Control and Life Support System (США).

С помощью физико-химической системы водоснабжения и очистки для технологических нужд можно обеспечить технологичные производства ЭКД необходимым сырьём без вмешательства в экосистему, снизить риск дефицита воды в случае внештатных ситуаций в одной из систем, а также сформировать более привычную среду для жизни человека, однако такой подход не предусматривает полную рециркуляцию воды.

Возможным способом достижения полной замкнутости системы является соединение углекислого газа, высвободившегося при очистке воздуха через цеолитовый фильтр, с водородом, образовавшимся в результате электролиза.

Ультрафильтрация воды (вспомогательная система). Принцип ультрафильтрации основан на мембранном разделении жидкости под давлением, при котором молекулы воды и низкомолекулярные соединения проходят через полупроницаемую мембрану, а высокомолекулярные примеси, коллоидные частицы и микроорганизмы задерживаются.

Данный метод обеспечивает получение воды с минимальным содержанием примесей (менее 1 мг/л), что соответствует требованиям к ультрачистой воде для микроэлектроники, фармацевтики и других высокотехнологичных отраслей, которые можно реализовать в условиях ближнего космоса.

Эффективность процесса очистки определяется селективностью мембран, изготавливаемых из полимерных материалов (полиэфирсульфон, поливинилиденфторид) с порами размером 1–100 нм. При этом возможны подбор и разработка полностью биодеградируемых мембран, что позволит компостировать их по истечении срока службы. В отличие от обратного осмоса ультрафильтрация не требует значительных энергозатрат, так как происходит при более низком давлении (0,1–0,5 МПа). Она является экономически целесообразной для масштабного применения.

Очищенная вода пригодна для использования не только в промышленности, но и после минерализации в качестве резервного источника питьевой воды в замкнутых экосистемах.

Обеспечение питанием

Внедрение автономной системы обеспечения продуктами питания в условиях космоса – сложная задача, потому что важно не только сделать человека сытым, но и снабдить его полным комплексом нутриентов для здоровья и высокой работоспособности, создать психологический комфорт, т. е. еда должна быть органической (природной), разнообразной, вкусной и выглядеть аппетитно [12].

Суточная норма килокалорий для мужчин составляет в среднем 2500–2800, для женщин – 2200–2400.

Ввиду необходимости максимально эффективного применения ресурсов и существующих технологий в ЭКД в качестве основных можно рассмотреть следующие процессы с замкнутым циклом:

- культивирование растений на гумусопонике (карликовая пшеница, салат, микроводоросли *Chlorella*, репа, соя, томаты, перец, огурцы и др.);
- разведение животных (морские свинки, перепела и др.);
- выращивание аквакультур, пресноводных и морских.

Гидропоника в настоящее время используется достаточно широко, однако имеет ряд недостатков: неполноценное питание растений и, соответственно, низкие нутриентные свойства урожая, необходимость внесения химических средств защиты растений, высокая чувствительность метода к изменению условий среды и компонентам смеси.

Гумусопоника, т. е. культивирование растений с задействованием биоудобрения uTerra, позволяет развить технологические преимущества гидропоники и выращивать культуры, применяя полный спектр элементов питания: макро-, микро- и ультрамикроэлементы, аминокислоты, сахара, метаболиты агрономически ценных почвенных микроорганизмов и др.

Имеются различные способы реализации такого подхода. В базовом варианте корневая система растений помещается в рабочий раствор uTerra, содержащий все органические и неорганические питательные вещества, а также агрономически ценные почвенные микроорганизмы (аэробные и анаэробные). Освещение осуществляется светодиодными светильниками спектром 400–700 нм и интенсивностью 250–400 мкмоль/с/м^2.

Результатом растениеводства и животноводства являются не только продукты питания, но и органические отходы. В ЭКД они утилизируются с помощью земляного червя и микроорганизмов, преобразуются в компост uTerra (жидкий и рассыпчатый) и используются в качестве органической подкормки для растений, обеспечивая круговорот живого вещества со всем необходимым набором макро-, микро- и ультрамикроэлементов [25, 26].

В частности, в процессе мойки и обработки пищевого сырья формируются загрязнённые сточные воды. Согласно существующим экологическим нормам, в земных условиях запрещено сбрасывать неочищенные (необезвреженные) стоки в окружающую среду, а в замкнутой экосистеме ЭКД этого делать тем более нельзя. Для очистки применяется их переработка в почве – аналогично решению, реализованному в экодоме на территории Крестьянского (фермерского) хозяйства «Юницкого» (г. Марьина Горка, Беларусь) [27]. При этом не производится разделение стоков на фракции – жидкую и осадок. Путём использования земляного червя, микроорганизмов и минеральных адсорбентов сточные воды подвергаются последующей очистке, в результате чего получаются биогумус uTerra и техническая вода, которая может применяться повторно для нужд ЭКД.

Благодаря созданной таким образом экосистеме достигается максимально высокая степень автономности в вопросах питания жителей и переработки отходов. В то же время требуется дополнительное изучение представленных методов с учётом всех особенностей замкнутой экосистемы биосферного типа.

Создание искусственной гравитации

Многие из нас слышали выражение: «Не возьмут тебя в космонавты!» Этому есть вполне логичное объяснение: для космических экспедиций выбирают наиболее подготовленных и физически здоровых людей, ведь в процессе полёта человеческий организм подвергается влиянию различных негативных факторов, одними из которых являются стартовые перегрузки и невесомость – отсутствие гравитации. Длительное воздействие невесомости отрицательно сказывается на любом живом организме, в том числе на человеке. В частности, ухудшается тонус мышц, возникают проблемы с опорно-двигательным аппаратом, нарушаются функции сердечно-сосудистой и выделительной систем.

Генерация искусственной гравитации – ключевая задача долгосрочных космических миссий, так как использование в условиях невесомости биологических, химических и физических принципов, задействованных в предложенных технологиях СЖО, часто ограничено или невозможно. Кроме того, требуется исключить или минимизировать последствия невесомости для организма человека.

Проведённые ранее исследования показали, что гравитационной нагрузки 1*g* (земная гравитация) достаточно для предотвращения негативного влияния невесомости на организм млекопитающих.

Наиболее реалистичный на сегодняшний день подход к созданию искусственной гравитации в ЭКД – это метод центробежной силы, т. е. вращение вокруг оси симметрии ЭКД, выполненного в виде тела вращения.

Центробежная сила определённой величины и продолжительности также вызывает перегрузку. Следовательно, нужно найти баланс, чтобы величина перегрузки от центробежной силы, действующей на человека, была легко переносимой и обеспечивалось минимально необходимое значение гравитационной нагрузки [28].

Предложенный принцип основан на использовании центробежного ускорения ε:

$$\varepsilon = v^2/r,$$

где v – линейная скорость, м/с;

r – радиус вращения, м.

Из формулы видна прямая зависимость величины ускорения от радиуса и линейной скорости вращения ЭКД. Например, при его внутреннем радиусе, равном 100 м, для получения земной гравитации (g = 9,8 м/с^2) линейная скорость поверхности «земли» (пола) должна быть равна 31,3 м/с, а при 200 м – 44,3 м/с. Это легко осуществить первоначальной раскруткой ЭКД при его монтаже на орбите. Поскольку в вакууме отсутствует сопротивление на вращение, этого импульса будет достаточно на весь срок службы ЭКД (100 лет и более). Для упрощения раскрутки большеразмерный и массивный ЭКД (масса около 100 000 тонн) целесообразно выполнить в виде двух спаренных корпусов, которые можно раскрутить друг относительно друга с помощью электродвигателя, без использования реактивных двигателей.

Заключение

В статье рассмотрены варианты перспективных технических решений, которые могут быть интегрированы с автономной биосферной системой ЭКД и служить для её взаимодействия с технологическими процессами, а также при необходимости выполнять вспомогательные и резервные функции.

Существующие орбитальные станции используют СЖО, основанные на физико-химических процессах, и поэтому требуют снабжения пищей (для питания экипажа) и водой (для питья и поддержания процесса электролиза). Текущие разработки ведущих космических держав преимущественно направлены на совершенствование физико-химических систем с целью повышения степени замкнутости по углекислому газу, водороду (реакции Сабатье, Боша) и др.

Орбитальные станции не отдают предпочтения биорегенеративным системам из-за ограниченного пространства, которым располагает экипаж, а также ввиду отсутствия развитой теоретической и практической базы по созданию условий для длительного пребывания человека в космосе.

В ходе изучения СЖО определены их особенности, преимущества и недостатки, приведены примеры оборудования. Разработана концепция совмещения замкнутой биосферной экосистемы и технических решений, сочетающая в себе биорегенеративные и физико-химические методы.

Данные решения не нарушают баланс биосферы, сочетают в себе подходящие физико-химические процессы и могут быть применимы в период тестирования моделей ЭКД, налаживания замкнутого цикла производства, организации высокотехнологичного производства в ближнем космосе.

Предложены направления использования побочных продуктов распада (водород, метан, углекислый газ): углекислый газ направляется для участия в процессе фотосинтеза растений, водород соединяется с углекислым газом

по реакции Сабатье для получения воды или применяется как топливо, метан используется в качестве топлива.

Темой дальнейших исследований в данном направлении может быть модернизация и подбор решений с учётом появляющихся перспективных разработок и технологий, уточнение параметров функционирования систем и их взаимосвязей для обеспечения максимально длительного поддержания комфортных и безопасных условий для жизни человека в экосистеме биосферного типа ЭКД.

Список основных источников

1. *NASA Environmental Control and Life Support Technology Development for Exploration: 2021 to 2022 Overview / J.L. Broyan, M. McKinley, I. Stambaugh [et al.]. // Texas Tech University Libraries. – URL: https://ttu-ir.tdl.org/server/api/core/bitstreams/916fa59a-565b-4a59-8850-a2117df25a2f/content (date of access: 23.05.2025).*
2. *Eckart, P. Spaceflight Life Support and Biospherics / P. Eckart. – Dordrecht: Springer, 1996. – 413 p.*
3. *Проект создания замкнутой экосистемы uBioSystem для бесконечно длительного автономного существования живых организмов / А.Э. Юницкий, А.М. Павлюченко, П.А. Буглак [и др.] // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 370–381.*
4. *Юницкий, А.Э. Особенности проектирования жилого космического кластера «ЭкоКосмоДом» – миссия, цели, назначение / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 51–57.*
5. *Юницкий, А.Э. Организация внутреннего пространства туристического цилиндрического ЭкоКосмоДома / А.Э. Юницкий, В.А. Платонова // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы III междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 12 сент. 2020 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2020. – С. 306–320.*
6. *Анализ способов получения кислорода для обеспечения жизнедеятельности герметично изолированных объектов / В.А. Пронин, Е.А. Калашникова, В.А. Цветков [и др.] // Вестник МАХ. – 2022. – № 3. – С. 13–20.*
7. *Выбор комплекса жизнеобеспечения для экипажей долговременных космических станций / А.С. Гузенберг, А.Г. Железняков, С.Ю. Романов [и др.] // Космическая техника и технологии. – 2015. – № 1 (8). – С. 67–80.*
8. *Плосконосов, А.А. Использование электролиза воды в космических целях / А.А. Плосконосов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. двадцать четвёртой междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Москва, 15–16 марта 2018 г. / М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. энергет. ин-т [и др.]. – М., 2018. – С. 717.*
9. *Gitelson, I.I. Manmade Closed Ecological Systems / I.I. Gitelson, G.M. Lisovsky, R.D. MacElroy. – London: Taylor & Francis, 2003. – 416 p.*
10. *Юницкий, А.Э. Использование хлореллы для производства кислорода и очистки сточных вод в замкнутых экосистемах / А.Э. Юницкий, О.В. Синчук // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 199–205.*
11. *Технологические системы для культивирования растений в ЭкоКосмоДоме / А.Э. Юницкий, Н.С. Зыль, Д.А. Конёк, М.М. Парфенчик // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 336–347.*
12. *Зыль, Н.С. Разработка универсального рациона питания жителей ЭкоКосмоДома / Н.С. Зыль, Е.А. Шахно // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы IV междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 18 сент. 2021 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2022. – С. 259–267.*
13. *Юницкий, А.Э. Гумусопоника как метод выращивания сельскохозяйственной продукции в условиях ЭкоКосмоДома / А.Э. Юницкий, Е.В. Шерешовец, В.В. Корней // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 348–357.*

14. *Старовойтов, С.В. Применение аэрационно-осветительной установки в биологическом фильтре / С.В. Старовойтов, А.С. Халил // Инженерный вестник Дона. – 2017. – №4. – URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_252_Starovoytov_Khalil.pdf_a24fc33645.pdf (дата обращения 23.05.2025).*

15. *Мальцев, Е.И. Использование диатомовых водорослей при повышении эффективности кормов для аквакультуры / Е.И. Мальцев, Н.А. Шкурина, М.С. Куликовский // Вопросы современной альгологии. – 2019. – № 2 (20). – С. 303–307.*

16. *Юницкий, А.Э. Пути адаптации и установления саморегуляции замкнутой экосистемы / А.Э. Юницкий, И.В. Налётов, В.С. Заяц // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы III междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 12 сент. 2020 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2021. – С. 388–401.*

17. *Патент Ru 2149136 C1. Термохимический генератор кислорода, состав твёрдого кислородовыделяющего элемента и устройство для снабжения кислородом: № 98116786/12: заявлено 11.09.1998: опубл. 20.05.2000 / Смирнов И.А., Логунов А.Т., Шаповалов В.В., Ванин В.И.; заявитель Смирнов И.А. – URL: https://patents.google.com/patent/RU2149136C1/ru (дата обращения: 23.05.2025).*

18. *Байрамова, А.С. Адсорбционная очистка газовых смесей от CO_2 и H_2S цеолитами / А.С. Байрамова // Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии – 2018: материалы междунар. науч.-практ. конф., Курск, 24–26 сент. 2018 г. / Юго-Зап. гос. ун-т; отв. ред. Л.М. Миронович. – Курск, 2018. – С. 189–191.*

19. *Патент Ru 2379102 C1. Поглотитель углекислого газа и способ очистки газовой смеси от углекислого газа: № 2008140002/15: заявлено 08.10.2008: опубл. 20.01.2010 / Окунев А.Г., Лысиков А.И., Нестеренко С.С.; патентообладатель Ин-т катализа им. Г.К. Борескова СО РАН. – URL: https://patents.google.com/patent/RU2379102C1/ru (дата обращения: 23.05.2025).*

20. *Гигиеническая характеристика факторов, определяющих уровень химических веществ, загрязняющих воздух орбитальных станций / А.А. Пахомова, Д.С. Царьков, А.В. Юргин, Ю.И. Смирнов // Пилотируемые полёты в космос: материалы XI междунар. науч.-практ. конф., Звёздный городок, 10–12 нояб. 2015 г. / Науч.-исслед. испыт. центр подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина. – Звёздный городок, 2015. – С. 167–168.*

21. *Об утверждении гигиенических нормативов: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 25 янв. 2021 г. № 37 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100037 (дата обращения: 23.05.2025).*

22. *Хомутинин, А.А. Лазерная абсорбционная спектроскопия / А.А. Хомутинин // Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых учёных: сб. науч. ст. 3-й всерос. науч. конф. перспектив. разработок, Курск, 1 дек. 2022 г.: в 4 т. / Юго-Зап. гос. ун-т [и др.]; отв. ред. М.С. Разумов. – Курск, 2022. – Т. 4. – С. 77–80.*

23. *Системы жизнеобеспечения экипажей длительных межпланетных экспедиций / С.Ю. Романов, А.Г. Железняков, А.А. Телегин [и др.] // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2007. – № 3. – С. 57–74.*

24. *Regeneration of Water and Atmosphere at Space Station: The Experience Gained on the Space Stations "Salut", "Mir", ISS and Development Prospects / L. Bobe, L. Gavrilov, A. Kochetkov [et al.] // 61st International Astronautical Congress 2010, Prague, 27 Sep. – 1 Nov. 2010 / International Astronautical Federation. – Prague, 2010. – Vol. 10. – P. 7884–7895.*

25. *Заяц, В.С. Роль метаногенных архебактерий в переработке органических отходов в условиях замкнутой экосистемы / В.С. Заяц, П.А. Буглак // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы IV междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 18 сент. 2021 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2022. – С. 331–339.*

26. *Биоутилизация органических остатков при помощи микроорганизмов / А.Э. Юницкий, Т.И. Пятакова, К.А. Бойко, И.В. Налетов // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 390–399.*

27. *Коттедж Garden Inn // Экопарк «Акварель». – URL: https://aquarellepark.by/hotels/eco-smart-complex/premium-cottage-garden-inn/ (дата обращения: 24.06.2025).*

28. *Котовская, А.Р. Проблема искусственной гравитации: состояние и перспективы / А.Р. Котовская // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2008. – Т. 42, № 6. – С. 74–83.*

УДК 66.047.76+504.062.4+628.33+629.7

Подготовка сорбента из пуха початков рогоза для очистки воды в замкнутых экосистемах

В.Н. Гаранин[1]
кандидат технических наук

А.А. Боровик[2]
кандидат технических наук

С.К. Протасов[2]
кандидат технических наук

[1] ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

[2] Белорусский государственный экономический университет, г. Минск, Беларусь

Изучены методы промышленной подготовки к хранению и последующему применению относительно нового адсорбента природного происхождения – пуха рогоза. Цели исследования – сравнительный анализ и разработка технологии сушки пуха рогоза для его использования в качестве эффективного адсорбента для очистки воды и кондиционирования воздуха в замкнутых экосистемах; выдача рекомендаций по выбору наиболее оптимальных способов подготовки данного материала в зависимости от конкретных условий и поставленных задач.

Описаны методики проведения эксперимента. Продемонстрированы результаты исследований естественной и конвективной сушки цельных початков, чистого пуха рогоза и пуха в матах. На основании заданной скорости движения сушильного агента, начальных показателей плотности и влагосодержания пуха, а также высоты его слоя построены кривые скорости сушки рассматриваемого сорбента для различных значений температуры сушильного агента (воздуха) и получена формула для расчёта времени конвективной сушки. Проанализированы преимущества и недостатки приведённых промышленных методов подготовки натурального сорбента, даны рекомендации для их практической реализации.

Показана возможность подготовки и применения пуха рогоза в космическом индустриальном ожерелье «Орбита» для очистки воды от различных примесей и для использования в системах кондиционирования воздуха.

Ключевые слова:
вода, замкнутая экосистема, очистка, рогоз, скорость, сушка, экология, эффективность.

UDC 66.047.76+504.062.4+628.33+629.7

Preparation of a Sorbent from Cattail Cob Fluff for Use in Water Purification Systems in Closed Ecosystems

V. Garanin[1]
Ph.D. in Engineering Sciences

A. Baravik[2]
Ph.D. in Engineering Sciences

S. Protasov[2]
Ph.D. in Engineering Sciences

[1] Unitsky String Technologies Inc., Minsk, Belarus

[2] Belarus State Economic University, Minsk, Belarus

The methods of industrial preparation for storage and subsequent utilization of the relatively novel natural adsorbent, cattail fluff, have been thoroughly investigated. The objectives of this study include conducting a comparative analysis and developing a technology for drying cattail fluff, aimed at its application as an effective adsorbent in water purification and air conditioning systems within closed ecosystems. Additionally, the article provides recommendations for selecting the most optimal methods for preparation of the of this material based on specific conditions and tasks.

The experimental methods employed are detailed, and the results of investigations of natural and convective drying of whole cobs, pure cattail fluff, and fluff in mats are presented. Based on specified speed of drying agent, the initial density and moisture content of the fluff as well as the height of its layer, drying speed curves for the sorbent were constructed, including for various values of the drying agent (air) temperature. The formula for calculating the convective drying speed was derived. The advantages and disadvantages of various industrial methods for preparing this natural sorbent are analyzed, accompanied by practical recommendations for their implementation.

The potential for utilizing cattail fluff in the Industrial Space Necklace "Orbit" for purifying water from various impurities and in air conditioning systems is demonstrated.

Keywords:
cattail, closed ecosystem, drying, ecology, efficiency, purification, speed, water.

Введение

В современном мире актуальны проблемы устранения последствий аварий, связанных с разливом нефти, а также массовой очистки сточных вод, образующихся в результате деятельности человека. Не менее важной является и очистка воды в замкнутых экосистемах, например в космическом индустриальном ожерелье «Орбита» (КИО «Орбита»), где особенно остро стоит вопрос обеспечения максимальной эффективности систем очистки воды (процессы её получения, использования и утилизации).

Один из распространённых способов очистки воды от примесей – применение различных адсорбентов [1], спрос на которые постоянно растёт из-за увеличения потребности людей в качественной воде. По этой причине именно поиск высокоэффективных адсорбентов, задействованных в системах очистки воды [2], считается первоочередной задачей. Основные критерии оценки таких материалов – технологичность, экологичность, показатели сорбционной ёмкости и многократность использования.

Среди различного экологичного сырья, способного продуктивно работать в качестве адсорбентов для очистки воды (например, торф или гречневая шелуха) [3, 4], для данного исследования выбран пух початков рогоза, который хорошо себя зарекомендовал при устранении аварийных разливов нефти [5–9] благодаря высоким сорбционным свойствам. Так, его сорбционная ёмкость по нефти составляет 17 000–45 000 мг/г, т. е. 1 г сорбента вбирает минимум 17 г сорбата (поглощаемое вещество). Для сравнения: у большинства других природных сорбентов этот показатель не превышает 9000 мг/г (например, сорбционная ёмкость материала на основе мха сфагнума – 4600–9000 мг/г; сорбента нефтепродуктов «СОНЕТ-1», произведённого на основе торфа, – 2000–4000 мг/г). Кроме того, плавучесть пуха рогоза в чистом виде превышает 100 дней, в насыщенном нефтью состоянии – более 120 дней. Сорбент на основе волосков пуха рогоза регенерируется отжимом не менее 50 раз.

Отработанный пух рогоза утилизируется биологическим методом [6]. Данное сырьё также можно использовать при производстве асфальтобетонов в качестве наполнителя [10] или в других композитных материалах (например, как натуральный наполнитель в путевых структурах рельсострунного транспорта).

Кроме того, на Земле рогоз играет важную роль в водном балансе экосистем, поскольку массово произрастает на топких берегах рек, озёр, прудов, а также в сырых заболоченных местах, образуя густые заросли. Растение эффективно удерживает влагу, что способствует созданию оптимальных условий для роста не только рогоза, но и других представителей флоры в экосистеме. Его присутствие в болотистых местностях помогает регулировать уровень воды в почве, предотвращая пересыхание и обеспечивая стабильность влажной среды обитания.

Благодаря указанным выше свойствам рогоз актуально рассматривать и для выращивания в замкнутых экосистемах (например, в ЭкоКосмоДоме (ЭКД), размещённом на КИО «Орбита» [11]). В закрытом космическом пространстве данное растение можно использовать в качестве строительного материала и накопителя воды, а также как регулятор водного баланса. В этой связи необходимо в первую очередь проанализировать возможность его подготовки и хранения в подобных условиях.

Цели настоящего исследования – разработка технологии сушки пуха рогоза для его применения в качестве эффективного адсорбента для очистки воды и кондиционирования воздуха в замкнутых экосистемах, а также выдача рекомендаций по выбору наиболее оптимальных способов подготовки данного материала в зависимости от конкретных условий и решаемых задач.

Особенности подготовки рогоза

Стебель рогоза заканчивается цилиндрическим початком тёмно-бурого цвета, состоящим из множества пушинок, плотно упакованных внутри вокруг питающего стебля (рисунок 1) [12]. Каждая пушинка имеет стволик, к которому прикреплены многочисленные волосинки, образующие древовидную форму. После созревания и естественного высыхания они расправляются, отделяются от стебля и рассеиваются воздушными потоками в окружающую среду.

Рисунок 1 – Початки рогоза

Установлено, что сорбционные свойства пуха рогоза обеспечиваются за счёт свободного пространства между волосинками и стволиками пушинок, а также между самими пушинками [6, 9].

Важно учитывать, что початки необходимо собирать сразу после их созревания, поскольку качество пуха быстро снижается, влияя тем самым на сорбционные свойства материала. Однако свежие початки имеют высокую влажность, которая приводит к развитию в них различных микроорганизмов, плесени, грибков и личинок насекомых. Следовательно, для обеспечения длительного хранения пуха (например, в сменных элементах систем очистки воды) его влажность должна быть такой, при которой исключается появление указанных выше вредных факторов. В настоящей работе предлагается высушивать пух рогоза до равновесного состояния, т. е. равновесное влагосодержание пуха должно находиться в пределах 0,11–0,12 $кг_{воды}/кг_{сух.м}$. Поддержание данного диапазона при длительном хранении в естественных условиях обеспечивает стабильность сорбционной ёмкости вещества и других важных показателей [6–9, 13–18].

Экспериментальная часть

Авторами в [19] предложены четыре основных промышленных способа предварительной подготовки пуха рогоза (до равновесного состояния) для последующего использования в качестве сорбента:

- срезание цельных созревших початков, а затем их сушка в природных условиях или в конвективных сушилках (способ № 1);
- срезание цельных созревших и влажных початков, отделение пуха от стеблей, одновременно распушивание его, сушка влажного пуха в конвективной сушилке (способ № 2);
- срезание цельных созревших початков, отделение пуха от стеблей, загрузка влажного пуха в маты и дальнейшая их сушка в конвективной сушилке (способ № 3);
- срезание цельных созревших початков, отделение пуха от стеблей, загрузка влажного пуха в маты и дальнейшая их сушка в естественных условиях (способ № 4).

Сушка цельных созревших початков до равновесного состояния в условиях земного климата – длительный процесс (неделя и более) [20]. Кроме того, из-за наличия влажного стебля наблюдается неравномерность высыхания початка: пух, примыкающий к стеблю, остаётся продолжительное время влажным, тогда как наружные слои высыхают быстрее, что приводит к распушиванию початка, отрыву пушинок и уносу их воздушными потоками. Такой способ существенно затрудняет сбор пуха, поэтому сушка цельных початков не может рассматриваться в качестве эффективного технологического решения.

На опытной установке, разработанной авторами (рисунок 2), ранее проводились исследования конвективной сушки цельных початков рогоза, которые плотно загружались в сушилку [6].

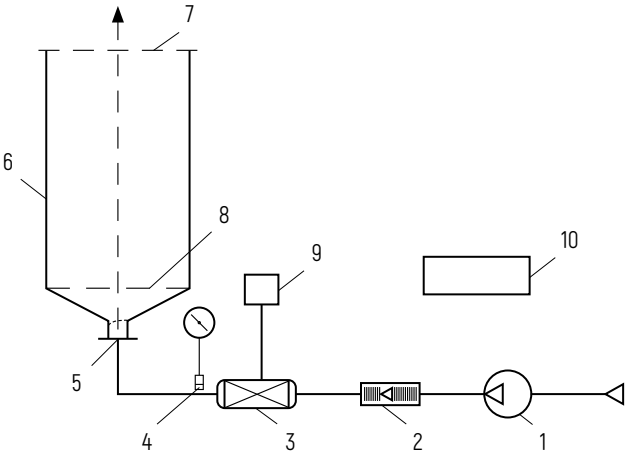


Рисунок 2 – Схема лабораторной установки, предназначенной для сушки рогоза:
1 – воздуходувка; 2 – прибор для измерения расхода воздуха; 3 – электрический калорифер; 4 – термометр; 5 – разъёмное устройство; 6 – корпус сушилки; 7 – крышка сушилки перфорированная; 8 – опорная решётка; 9 – лабораторный трансформатор; 10 – весы

Представленная схема установки может быть модернизирована и масштабирована до нужной промышленной производительности даже в ЭКД.

Эксперименты, проведённые в лабораторных условиях путём пропускания нагретого воздуха через неподвижный слой пуха в початках, позволили построить кривые сушки початков рогоза (зависимость влагосодержания початков рогоза от времени сушки). Установлено, что приблизиться к состоянию равновесия (влагосодержание $U_р$ = 0,11 $кг_{воды}/кг_{сух.м}$) между початками и окружающим воздухом можно за 8 ч [12, 14, 16, 17].

Кроме того, применялась усовершенствованная весовая методика экспериментальных исследований, которая заключалась в периодическом взвешивании высушиваемого материала вместе с сушильным аппаратом и в последующей обработке результатов с помощью специальной компьютерной программы [21].

Определено, что наибольшее влияние на время сушки оказывает температура сушильного агента (воздуха) на входе в слой. Время и скорость процесса зависят также от скорости воздуха в слое, начального влагосодержания пуха, его плотности и высоты слоя в сушилке [13].

На этой же лабораторной установке по описанной выше методике выполнялась сушка пуха, полученного путём распушивания початков рогоза и затем загруженного в сушильную камеру. Исследования проводились в широких диапазонах варьирования температур (от 60 до 100 °С с шагом 10 °С) и скоростей движения сушильного агента (от 0,2 до 0,8 м/с с шагом 0,2 м/с), начального влагосодержания (от 0,5 до 1,75 $кг_{воды}/кг_{сух.м}$) и объёмной плотности пуха (от 25 до 120 кг/м^3). По результатам экспериментов построены кривые сушки, а также графические зависимости скорости сушки и максимальной скорости сушки от температуры сушильного агента, начального влагосодержания пуха, его плотности и высоты слоя в сушилке; осуществлён анализ полученных данных.

Зависимость влагосодержания пуха от времени конвективной сушки адсорбента в свободном состоянии для разных начальных температур воздуха при скорости сушильного агента 0,4 м/с представлена на рисунке 3.

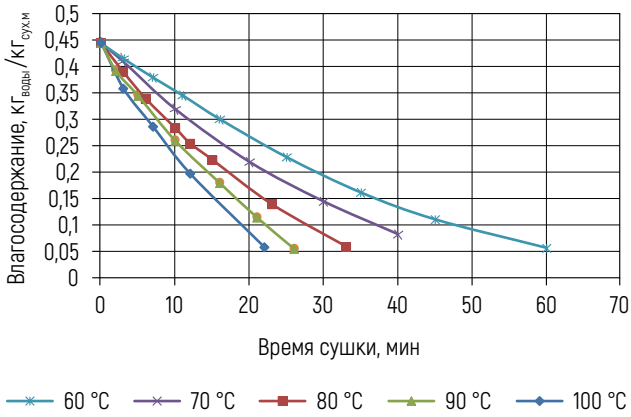


Рисунок 3 – Кривые сушки пуха початков рогоза при скорости сушильного агента 0,4 м/с и его разных начальных температурах

Экспериментальным и расчётным способом установлено, что время достижения равновесного влагосодержания пуха ($U_р$ = 0,11 $кг_{воды}/кг_{сух.м}$) от начального влагосодержания ($U_н$ = 0,45 $кг_{воды}/кг_{сух.м}$) при конвективной сушке не превышает 1 ч для широкого диапазона варьирования температур.

Из представленных графиков видно, что с ростом температуры сушильного агента время сушки значительно сокращается. Используя метод аппроксимации кривых, получена формула для расчёта времени сушки до равновесного влагосодержания:

$$\tau = 1{,}22 \times 10^{-6} \times f(t) \times f(V) \times f(U_н) \times f(h) \times f(\rho), \quad (1)$$

$$f(t) = 0{,}0111t^2 - 2{,}45t + 151{,}94, \quad (2)$$

$$f(V) = 127{,}8V^2 - 155{,}77V + 69{,}12, \quad (3)$$

$$f(U_н) = 136{,}6U_н - 49{,}44U_н^2 - 38{,}56, \quad (4)$$

$$f(h) = 0{,}0026h^2 - 0{,}32h + 18{,}8, \quad (5)$$

$$f(\rho) = 0{,}0214\rho^2 - 3{,}27\rho + 153{,}48, \quad (6)$$

где τ – время сушки, мин;

t – температура сушильного агента, °С;

V – скорость сушильного агента, м/с;

$U_н$ – начальное влагосодержание пуха, $кг_{воды}/кг_{сух.м}$;

h – высота слоя пуха, мм;

ρ – начальная плотность пуха, кг/м^3.

Подстановка значений (с учётом данных, представленных на рисунке 3) в формулу (1) показала погрешность расчётов не более 8 %.

Ввиду того что при работе экспериментальной установки наблюдалась высокая летучесть сухого пуха, исследовалась сушка не только чистого пуха, загружаемого в сушильную камеру, но и сушка пуха в матах, плотно размещённых в корпусе и имеющих оболочку из натурального хлопчатобумажного материала низкой плотности, например ситца или миткаля (рисунок 4).

Рисунок 4 – Испытываемый адсорбент (свободный и в матах)

Несмотря на необходимость дополнительной технологической стадии, упаковка пуха в маты не позволяет ему разлетаться, что снижает потери, упрощает чистку оборудования и сокращает время на загрузку и выгрузку партий из сушилки. Значит, такая технология подготовки пуха рогоза является оптимальной [22] и при промышленном его применении в качестве адсорбента. Поскольку наличие матов практически не влияет на процессы высушивания, то результаты, полученные при сушке чистого (свободного) пуха, можно распространить и на сушку пуха в матах.

Для того чтобы изучить данный процесс при минимальных энергозатратах, дополнительно проведена экспериментальная естественная сушка пуха рогоза в закрытом помещении без принудительной циркуляции воздуха [14]. В ходе исследований [8] установлено, что при комнатной температуре и $U_н$ = 0,45 $кг_{воды}/кг_{сух.м}$ равновесное состояние пуха достигается в среднем за 20 ч, т. е. по сравнению с конвективной сушкой время высушивания увеличивалось в 20 раз. Однако, используя потенциал космического излучения в КИО «Орбита», имеется возможность снизить продолжительность естественной сушки.

Заключение

Рассматривая преимущества и недостатки каждого из перечисленных основных способов сушки пуха рогоза, можно сделать определённые выводы.

1. Сушка цельных початков рогоза (способ № 1) не требует предварительного распушивания, что упрощает и ускоряет общий процесс подготовки адсорбента. Однако из-за высокого диффузионного и термического сопротивления переносу массы и тепла время высушивания возрастает. Кроме того, по мере высыхания початки начинают самораспушиваться, что сопровождается отрывом пушинок. Сухой пух ввиду низкой плотности обладает высокой летучестью, поэтому его сбор после сушки для дальнейшего использования связан с некоторыми трудностями, в том числе с потерями высушенного материала. Этот же недостаток характерен и для способа № 2 при выгрузке высушенного пуха из конвективной сушилки для хранения и последующего применения.

2. Предварительное распушивание влажных початков (способ № 2) перед загрузкой в сушильный аппарат не приводит к уносу пуха воздухом (влажный пух вследствие большей плотности не обладает высокой летучестью). В процессе предварительного распушивания влажный пух подсыхает, поэтому время сушки в установке значительно сокращается. При способе № 2 не производится сушка стеблей рогоза, в которых сосредоточено относительно много влаги. Этим достигается экономия энергии (тепло на сушку и электроэнергия на работу вентиляторов) и существенно ускоряется высушивание.

3. Наиболее рациональными являются способы № 3 и 4 (сушка в матах или других матерчатых формах), поскольку при распушивании початков и загрузке влажного пуха в маты не происходит его унос воздухом. При этом, что особенно важно, выгрузка высушенного в матах пуха не приводит к его потерям вследствие выброса в окружающую среду.

Нужно отметить основное преимущество способов № 3 и 4: маты с высушенным до равновесного состояния пухом хранятся достаточно длительное время в помещениях. При необходимости эти формы максимально быстро и удобно доставляются к месту назначения, где они для очистки воды раскладываются на загрязнённой поверхности или опускаются в специальные водяные контейнеры проточного типа. Использованные маты легко регенерировать, например, методом отжима, пропуская их между вращающимися вальцами и собирая загрязняющие вещества в специальную ёмкость, или за счёт вакуума. Восстановленные маты пригодны для повторной эксплуатации. В некоторых случаях регенерация матов производится непосредственно в контейнерах.

4. На Земле способ № 4 более экономичен по сравнению со способом № 3, поскольку для испарения влаги используется теплота окружающей среды, а не калорифера. Кроме того, не требуется установка вентиляторов. Однако сушка в естественных условиях предполагает наличие соответствующих помещений, она намного продолжительнее, чем конвективная. Значит, способ № 4 предпочтительнее для заготовки и длительного хранения определённых запасов пуха рогоза в матах. Способ № 3 следует применять в случае необходимости максимально быстрого задействования большого количества сорбентов (при ликвидации массового загрязнения обширных территорий и акваторий, а также в других аналогичных ситуациях), когда заготовленных запасов, в том числе в матах, недостаточно.

Поскольку пух рогоза показал себя отличным адсорбентом для очистки воды от нефти, нефтепродуктов и прочих органических веществ, например масел растительного происхождения, то имеются серьёзные основания для его использования как сорбента при очистке воды в КИО «Орбита», включая очистку отработанных

технологических и биоканализационных вод, что станет следующим этапом научных исследований данного направления.

Важно отметить, что сушку пуха можно производить за счёт энергии космического солнечного излучения. Если будет целесообразно, то в околоземном пространстве для ускорения высушивания пуха допустимо задействовать космический вакуум.

При использовании пуха початков рогоза в КИО «Орбита» для очистки воды от различных примесей предполагается на начальном этапе его доставка с Земли в специальных матах, которые удобно помещать в ёмкости очистки систем водоснабжения жилых модулей. По мере насыщения загрязняющими веществами маты можно регенерировать. После завершения эксплуатации указанного адсорбента проводится его утилизация биологическим методом без возвращения на Землю и организуется выращивание рогоза и получение пуха уже на орбитальной станции.

Следует отметить, что пух рогоза обладает высокой скоростью высыхания и увлажнения, что делает его эффективным в системах биологического кондиционирования воздуха.

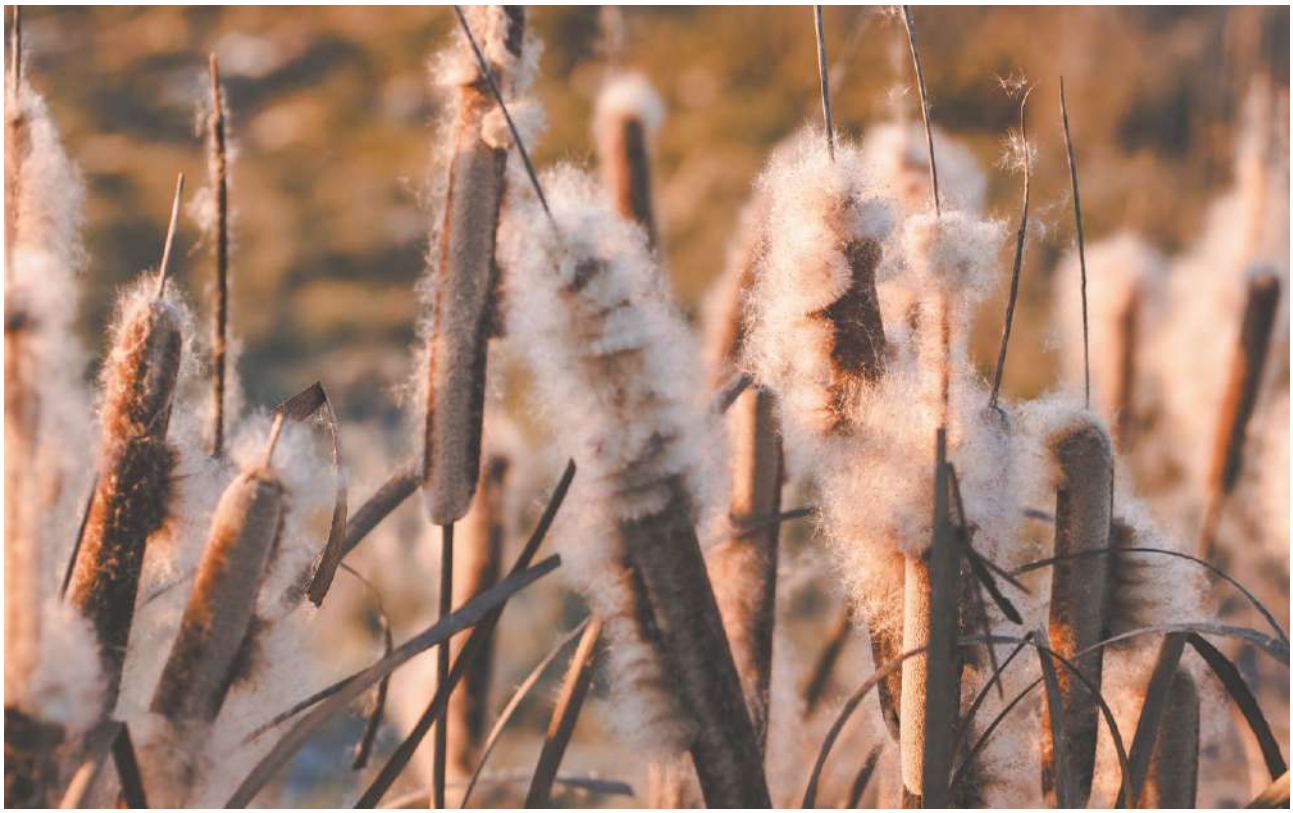
С учётом свойств рогоза актуальным является и вопрос организации его комплексной переработки, в первую очередь стеблей, для применения в различных технологиях [23]. Таким образом можно обеспечить замкнутый цикл использования данного растения.

Список основных источников

1. *Рябчиков, Б.Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования / Б.Е. Рябчиков. – М.: ДеЛи принт, 2004. – 326 с.: ил., табл.*
2. *Романова, Е.С. Обзор существующих систем очистки воды / Е.С. Романова, И.С. Найденов // Холодная наука. – 2024. – №° 2. – С. 52–60.*
3. *Исследование сорбционных свойств материалов на основе растительного сырья по отношению к органическим и неорганическим примесям / Э.Т. Ямансарова, Н.В. Громыко, М.И. Абдуллин [и др.] // Вестник Башкирского университета. – 2016. – Т. 21, №° 2. – С. 314–318.*
4. *Уголь активированный. Стандартный метод определения сорбционных характеристик адсорбентов: ГОСТ 33627-2015. – Введ. 01.04.2017. – М.: Стандартинформ, 2019. – IV, 12 с.*
5. *Собгайда, Н.А. Новые углеродные сорбенты для очистки воды от нефтепродуктов / Н.А. Собгайда, А.И. Финаенов // Экология и промышленность России. – 2005. – №° 12. – С. 8–11.*
6. *Технология сушки природного нефтесорбента на основе волосков гинофора летучек рогоза / С.К. Протасов, О.Г. Горовых, А.А. Боровик, К.Ф. Саевич // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2021. – №° 8. – С. 33–38.*
7. *Протасов, С.К. Исследование процессов сушки пуха рогоза / С.К. Протасов, А.А. Боровик, А.М. Брайкова // Мичуринский агрономический вестник. – 2021. – №° 1. – С. 87–96.*
8. *Исследование кинетики сушки пуха рогоза / С.К. Протасов, А.А. Боровик, О.Г. Гороховых, А.М. Брайкова // Norwegian Journal of Development of the International Science. – 2021. – №° 70 (1). – С. 36–41.*
9. *Горовых, О.Г. Получение нефтесорбента на основе волосков гинофора летучек рогоза / О.Г. Горовых, Б.А. Альжанов, А.А. Боровик // Вестник Кокшетауского технического института МЧС Республики Казахстан. – 2021. – №° 1 (41). – С. 59–67.*
10. *Исследования структурно-механических свойств дисперсно-армированных органоминеральных материалов / В.Н. Лукашевич, И.В. Ефанов, Г.И. Прокофьева, И.В. Вакс // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – №° 6. – С. 177–185.*
11. *Юницкий, А.Э. ЭкоКосмоДом как пространство для сохранения видового разнообразия тропической и субтропической флоры / А.Э. Юницкий, В.К. Павловский, Д.В. Феофанов // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 153–157.*
12. *Верзилин, Н.М. По следам Робинзона / Н.М. Верзилин. – 3-е изд. – Л.: Детгиз, Ленинград. отд-ние, 1956. – 279 с.: ил.*
13. *Протасов, С.К. Расчёт времени сушки пуха рогоза в конвективной сушилке / С.К. Протасов, А.А. Боровик, А.М. Брайкова // Мичуринский агрономический вестник. – 2023. – №° 2. – С. 65–74.*
14. *Протасов, С.К. Естественная сушка пуха рогоза // С.К. Протасов, А.А. Боровик, А.М. Брайкова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – Вып. 9. – С. 527–530.*
15. *Протасов, С.К. Влияние плотности пуха рогоза на кинетику сушки / С.К. Протасов, А.А. Боровик, М.А. Брайкова //*

Мичуринский агрономический вестник. – 2023. – № 1. – С. 100–104.

16. *Технология сушки природного высокоэффективного нефтесорбента на основе пуха початков рогоза / С.К. Протасов, А.А. Боровик, О.Г. Горовых, Б.А. Альжанов // Slovak International Scientific Journal. – 2021. – № 52. – С. 24–31.*
17. *Кинетика сушки природного нефтесорбента – пуха рогоза / С.К. Протасов, А.А. Боровик, О.Г. Горовых, А.М. Брайкова // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 46–54.*
18. *Протасов, С.К. Конвективная сушка пуха рогоза / С.К. Протасов, А.А. Боровик, М.А. Брайкова // Мичуринский агрономический вестник. – 2022. – № 1. – С. 63–69.*
19. *Боровик, А.А. Подготовка пуха початков рогоза для использования в качестве эффективного нефтесорбента / А.А. Боровик, С.К. Протасов // Актуальные проблемы физики и технологии в образовании, науке и производстве: материалы VI нац. науч.-практ. конф. (с междунар. участием), Рязань, 28 марта 2024 г. / М-во науки и высш. образования РФ [и др.]; под ред. О.В. Кузнецовой, Н.Б. Федоровой. – Рязань, 2024. – С. 98–102.*
20. *Альжанов, Б.А. Полигонные испытания природного сорбента на основе волосков околоцветника початков рогоза по сбору нефтяных загрязнений / Б.А. Альжанов, О.Г. Горовых // Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций: сб. тез. X междунар. науч.-практ. конф., Кокшетау, 26–27 окт. 2019 г. / Комитет по чрезвыч. ситуациям МВД Респ. Казахстан, Кокшетаус. техн. ун-т; редкол.: С.Д. Шарипханов (гл. ред.) [и др.]. – Кокшетау, 2019. – С. 46–48.*
21. *Боровик, А.А. Новая весовая методика исследования конвективной сушки / А.А. Боровик, С.К. Протасов, А.М. Брайкова // Химическая промышленность. – 2021. – Т. 98, № 3. – С. 148–152.*
22. *Да Консейсао, А.А. Поглощение разлитых нефти и нефтепродуктов сорбентом «Dulromabsorb», помещённым в нефтепроницаемые оболочки / А.А. да Консейсао, Н.А. Самойлов, Р.Н. Хлесткин // Башкирский химический журнал. – 2006. – Т. 13, № 4. – С. 65–70.*
23. *Муминова, Г.М. Изучение механических свойств рогоза / Г.М. Муминова, Ш.А. Гуламов, А.Т. Мамадалимов // Молодой учёный. – 2018. – № 19 (205). – С. 144–146.*



УДК 629.78+624.94+691.175.5/.8

Применение кварценаполненного композита в ответственных узлах взлётно-посадочной эстакады общепланетарного транспортного средства

М.В. Мозгалёва

Е.Н. Зеленкова
кандидат технических наук

В.Н. Гаранин
кандидат технических наук

С.В. Мозгалёв

ЗАО «Струнные технологии»,
г. Минск, Беларусь

Проведён эксперимент по созданию композитного материала на основе эпоксидного связующего с применением пылевидного кварца – тонкодисперсного природного минерала.

Определён оптимальный состав кварценаполненного эпоксидного компаунда для использования в ответственных конструкциях взлётно-посадочной эстакады общепланетарного транспортного средства. Изготовлены опытные образцы, содержащие пылевидный кварц от 40 до 70 масс. %, и проведены экспериментальные испытания по изучению их прочности при растяжении и сжатии, твёрдости по Шору D, плотности, линейной усадки при высыхании, жизнеспособности составов и времени полного отверждения при температуре 20 °С.

Выявлено, что все образцы демонстрируют высокие прочностные характеристики, низкую усадку, оптимальную плотность и ускоренное отверждение по сравнению с традиционными строительными материалами, включая тяжёлые бетоны. Установлено, что наилучшие свойства достигаются при содержании пылевидного кварца 60 масс. %: прочность при сжатии не менее 110 МПа и при растяжении не менее 28 МПа; материал полностью отвердевает менее чем за сутки. Применение данного компаунда позволяет увеличить скорость строительных работ до 28 раз. Это открывает новые возможности в возведении линейных транспортных систем и объектов повышенной ответственности в рамках реализации геокосмической программы uSpace.

Ключевые слова:
бетон,
взлётно-посадочный комплекс,
композитный материал,
общепланетарное транспортное средство (ОТС),
программа uSpace,
прочность, состав,
строительство.

UDC 629.78+624.94+691.175.5/.8

Application of Quartz-Filled Composite in Critical Components of Takeoff and Landing Overpass of General Planetary Vehicle

M. Mazgaliova

E. Zelenkova
Ph.D. in Engineering Sciences

V. Garanin
Ph.D. in Engineering Sciences

S. Mazgaliov

Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

An experiment was conducted to create a composite material based on an epoxy binder incorporating quartz powder as a finely dispersed natural mineral.

The optimal composition of a quartz-filled epoxy compound has been determined for use in critical structural components of the takeoff and landing overpass of the General Planetary Vehicle. Experimental samples containing 40–70 wt. % powdered quartz were manufactured and tested to evaluate tensile and compressive strength, Shore D hardness, density, linear shrinkage during curing, pot life, and full curing time at 20 °C.

The results demonstrate that all samples exhibit high strength characteristics, low shrinkage, optimal density, and accelerated curing compared to conventional construction materials, including heavy concrete. It was established that the best performance is achieved at a powdered quartz content of 60 wt. %: compressive strength of at least 110 MPa and tensile strength of at least 28 MPa. The material fully cures in less than 24 h. The application of this compound makes it possible to increase construction speed by up to 28 times, opening new opportunities for the development of linear transport systems and critical infrastructure facilities within the framework of the uSpace geocosmic program.

Keywords:
composite material, composition, concrete, construction, General Planetary Vehicle (GPV), strength, takeoff and landing complex, uSpace program.

Введение

Современные направления в освоении околоземного пространства предъявляют всё более жёсткие требования к качеству и эксплуатационным характеристикам конструкционных материалов. Применение бетона не всегда способствует решению сложных инженерных задач, в том числе при возведении объектов планетарного транспорта в рамках реализации геокосмической программы uSpace [1]. Согласно прогнозам планируется использование существенных объёмов данного материала [2], однако поиск альтернатив, позволяющих снизить его потребление и улучшить эксплуатационные характеристики сооружений, приобретает особую значимость для развития строительных технологий.

Большое внимание уделяется разработке решений для тех элементов сооружений, которые несут повышенные нагрузки и критичны для общей надёжности конструкций. Для подобных узлов необходимы материалы, обладающие прочностью, долговечностью и низкой массой [3], что открывает возможности для внедрения композитов в том числе при строительстве объектов, предусмотренных программой uSpace. В первую очередь следует обратить внимание на составы с минеральными наполнителями, например с кварцем [4], которые способны сочетать прочность при растяжении и сжатии, устойчивость к трещинообразованию, высокую твёрдость, минимальную усадку и достаточную надёжность при эксплуатации. Благодаря таким свойствам данные материалы можно рассматривать как перспективную альтернативу традиционным цементно-бетонным смесям для ответственных элементов взлётно-посадочной эстакады общепланетарного транспортного средства (uWay).

Эпоксидные композиты для инфраструктуры uWay

Эпоксидные смолы – один из наиболее универсальных и широко применяемых классов термореактивных полимеров, которые после отверждения образуют прочную трёхмерную сшитую структуру с высокими физико-механическими характеристиками и увеличенной стойкостью к внешним воздействиям. Важной особенностью эпоксидных систем является возможность их модификации путём введения различных наполнителей, которые позволяют не только уменьшить себестоимость материала, но и придать компаунду дополнительные свойства: повысить твёрдость и износостойкость, изменить теплопроводность или электропроводность, снизить тепловое расширение, а также улучшить демпфирующие характеристики [5–9]. Благодаря этому эпоксидные смолы используются в авиационно-космической отрасли, судостроении, электронике и строительстве [6].

В качестве наполнителей для эпоксидных компаундов применяются природные минералы и горные породы (кварц, каолин, андезит, мел, базальт, диабаз), искусственные материалы (аэросил, кокс, графит), а также отходы различных производств (шлаки металлургической промышленности, стеклобой, зола-унос, обрезки полимерных материалов, измельчённые остатки электрооборудования) и другие техногенные продукты, обладающие необходимыми физико-химическими характеристиками для придания компаунду заданных параметров – прочности, термостойкости, электропроводности или адгезии [7].

Особенно широкое распространение получили природные минеральные наполнители, которые после дробления и тонкого помола вводят в компаунд для придания ему определённых эксплуатационных свойств. Наиболее часто используемыми являются кварц, микромрамор, барит, тальк, каолин, базальт и другие породы [8]. Их применение существенно повышает физико-механические характеристики составов, которые становятся реальной альтернативой традиционным бетонным материалам, особенно в конструкционных узлах, где требуется сочетание прочности и долговечности.

Минеральные наполнители могут использоваться как по отдельности, так и в комбинации, что позволяет гибко управлять характеристиками эпоксидного материала под конкретные условия эксплуатации. Доказано: добавление кварца значительно повышает твёрдость и износостойкость [9], микромрамор способствует равномерному распределению напряжений и снижает риск образования микротрещин, а барит увеличивает плотность и вибропоглощающие свойства заливочных составов [10]. Тальк в сочетании с иными наполнителями улучшает демпфирование и устойчивость к динамическим нагрузкам. Каолин и другие глинистые минералы усиливают термостойкость и помогают формировать однородную, бездефектную структуру компаунда. Для наращивания прочности, жёсткости и теплостойкости эпоксидных композитов хорошо себя зарекомендовали диорит и хромит [11–13]. Правильно подобранный состав наполнителей обеспечивает баланс прочности, твёрдости, долговечности и стойкости к вибрациям.

Таким образом, использование природных минеральных наполнителей – это инженерный инструмент, позволяющий создавать компаунды, которые способны заменить традиционные материалы.

Цель настоящей работы заключается в определении оптимального состава кварценаполненного композитного материала и оценке его прочностных характеристик с точки зрения перспектив применения в ответственных узлах uWay с акцентом на повышение их надёжности и ресурса.

Материалы и методы исследования

Среди рассмотренных минеральных наполнителей особого внимания заслуживает кварц, который традиционно применяется в виде песка или кварцевой муки и является наиболее доступным. Вместе с тем существует ещё одна дисперсная разновидность этого материала – кварц пылевидный, который по ГОСТ 9077-82 необходим преимущественно для литья по выплавляемым моделям. В настоящей работе решено остановиться на использовании в качестве наполнителя именно такого кварца, поскольку он доступен, не требует сложного введения и позволяет значительно снизить себестоимость композитного материала.

Для того чтобы получить информацию об основных физико-механических свойствах данного эпоксидного компаунда, в лабораторных условиях ЗАО «Струнные технологии» (г. Минск, Беларусь) осуществлена серия экспериментальных исследований по подбору и оптимизации его состава. Процесс включал выбор сырьевых компонентов, изготовление образцов, проведение испытаний и анализ результатов.

1. Выбор исходных компонентов.

Исходя из [5–13], предложено использовать для изготовления опытных образцов следующие компоненты:

- эпоксидная смола CYD-128 (Sinopec Bailing Petrochemical Co., Китай) – стандартная жидкая эпоксидная смола на основе бисфенола-А и эпихлоргидрина; ключевые характеристики: эпоксидное число – 184–194 г/экв; вязкость при 25 °С – 11 000–14 000 мПа · с (по документации изготовителя);
- отвердитель ВА-20 (Nouryon Functional Chemicals AB, Швеция) – сбалансированная композиция линейных полиаминов с гидроксильным числом ≈ 350 мг КОН/г (по документации изготовителя) в стехиометрическом соотношении с эпоксидом;
- пылевидный кварц (филиал Гомельского горно-обогатительного комбината ОАО «Гомельстекло», Беларусь): марка А (по ГОСТ 9077-82), размеры частиц 3–16 мкм;
- вспомогательные компоненты: реактивный разбавитель SM-90 (Jiangsu Sanmu Group Corporation, Китай), тальк ТМК-27 (TALKRUS, Россия);
- функциональные добавки.

2. Формирование образцов для исследований.

В рамках работы подготовлено четыре вида образцов с различным содержанием кварцевого наполнителя по массе: 40, 50, 60 и 70 %, что в дальнейшем позволит обосновать выбор количества наполнителя.

Процесс приготовления каждого вида композита включал предварительное смешивание всех компонентов (кроме наполнителя) в течение 3 мин при скорости 100–150 об/мин с использованием мешалки лабораторной верхнеприводной US-2200D до получения однородной массы. Далее постепенно добавляли кварцевый наполнитель, тщательно перемешивая в течение 5 мин при 100 об/мин, чтобы предотвратить агрегацию частиц и появление воздушных включений. Формование образцов осуществляли в сушильном шкафу ШС-80-01 МК СПУ комбинированным способом отверждения: сначала выдерживали при комнатной температуре (20 ± 2) °С в течение 24 ч, а затем проводили термическую обработку при (80 ± 2) °С в течение 4 ч для завершения реакции сшивки.

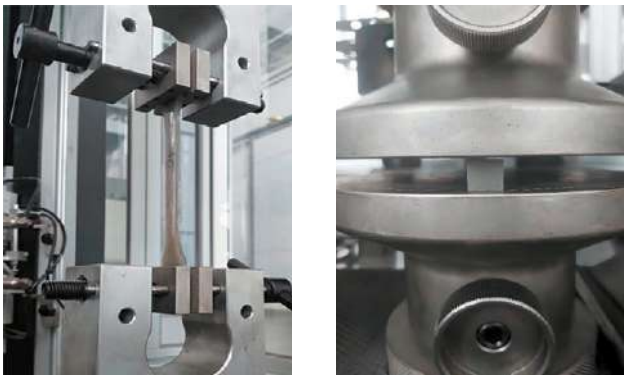
Размер образцов при сжатии – 10 × 10 × 10 мм согласно ГОСТ 4651-2014 (кубик). Размер образцов при растяжении – образец типа 2 согласно ГОСТ 11262-2017 (лопатка).

3. Испытания свойств образцов.

Испытания проходили в стандартных лабораторных условиях при температуре (23 ± 2) °С и относительной влажности (50 ± 5) %.

Исследование образцов эпоксидного композита с различным содержанием кварцевого наполнителя выполнялось с применением разрывной машины Quasar 250 (Galdabini, Италия) по основным показателям:

- прочность при растяжении (скорость нагружения 5 мм/мин) согласно ГОСТ 11262-2017 (рисунок 1а);



а) б)

Рисунок 1 – Машина испытательная универсальная Galdabini Quasar 250: а – испытание на растяжение; б – испытание на сжатие

- прочность при сжатии по ГОСТ 4651-2014 (рисунок 1б).

С целью сравнительного анализа измерялись:

- твёрдость по Шору D согласно ГОСТ Р 57593-2017;
- плотность по ГОСТ 15139-69;
- линейная усадка при высыхании по ГОСТ Р 57593-2017;
- время жизнеспособности и полного отверждения при 20 °С по методикам, разработанным авторами.

Для того чтобы определить время жизнеспособности компаунда, сначала навеску предварительно подготовленной смеси в количестве (100 ± 1) г помещали в стакан объёмом 200 см^3. В соответствии с рецептурой также добавляли требуемое количество отвердителя. После массу тщательно перемешивали стеклянной палочкой в течение 3 мин до получения однородности. С момента добавления отвердителя начинали отсчёт. Далее с регулярными интервалами с помощью стеклянной палочки проверяли состояние компаунда. Момент, когда масса утратила текучесть и отвердела (перемешивание стеклянной палочкой стало невозможным), фиксировали как время жизнеспособности компаунда при данных условиях.

Время полного отверждения компаунда – интервал от момента смешивания компонентов до достижения материалом окончательных прочностных и эксплуатационных характеристик при стандартных параметрах. Для определения этого показателя подготовленный компаунд выдерживали в контролируемых условиях без перемешивания и внешнего воздействия. Через 4, 8, 12, 24 ч производили проверку степени отверждения. Критерии окончания процесса: полное исчезновение липкости поверхности, устойчивость формы, а также стабильность механических характеристик (проверка на прочность при сжатии или твёрдость). Время полного отверждения фиксировали как момент, начиная с которого компаунд не менял своих механических свойств при дальнейшем хранении в тех же условиях и не демонстрировал признаков недоотверждения (липкость, мягкость, деформация под давлением).

Для обеспечения достоверности результатов все испытания осуществлялись не менее чем на трёх образцах каждого состава. Полученные данные усреднялись, а отклонения анализировались для оценки воспроизводимости и статистической надёжности измерений.

Экспериментальная часть

Экспериментальная часть направлена на изучение физико-механических свойств разрабатываемого компаунда. Основное внимание сосредоточено на определении его прочностных характеристик. Итоговые данные, полученные в ходе исследования, сведены в таблицу.

Таблица – Результаты испытаний образцов эпоксидного композита с различным содержанием наполнителя

Параметр	Содержание наполнителя, масс. %				Бетонные смеси С25–С40 [14]
	40	50	60	70	
Твёрдость по Шору D, не менее	72	77	80	80	–
Прочность при сжатии (скорость нагружения 5 мм/мин), не менее, МПа	73	92	110	104	25–40
Прочность при растяжении (скорость нагружения 5 мм/мин), не менее, МПа	32	29	28	19	3–6
Усадка при высыхании, не более, %	0,02	0,02	0,01	0,01	0,04–0,06
Плотность, кг/м^3	1350 ± 10	1380 ± 10	1410 ± 10	1450 ± 10	Около 2400
Жизнеспособность, мин	30–40	30–40	30–40	30–40	60–180
Время полного отверждения, сутки	0,5–1	0,5–1	0,5–1	0,5–1	Не менее 28

Согласно приведённой информации все опытные образцы характеризуются хорошими физико-механическими показателями, что соответствует самым высоким классам бетонов и значительно превышает свойства широко используемых в строительстве бетонов марок С25–С40.

Оптимальные результаты выявлены при содержании пылевидного кварца 60 масс. %: прочность при сжатии достигала не менее 110 МПа (рисунок 2), твёрдость поверхности образцов по Шору D составила не менее 80, а усадка снизилась до 0,01 %.

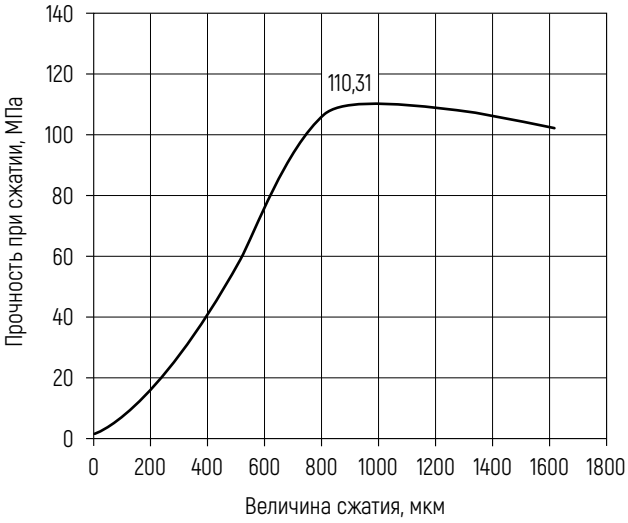


Рисунок 2 – Прочность при сжатии (скорость нагружения 5 мм/мин) для образца с наполнителем 60 масс. %

Увеличение содержания наполнителя до 70 масс. % привело к сильному загущению смеси, усложнению дегазации и снижению прочности до 104 МПа вследствие дефицита связующего компонента, обеспечивающего адгезионное взаимодействие на границе раздела фаз «наполнитель – связующее». В итоге нарушилась целостность структуры композитного материала, что негативно сказалось на его механических свойствах.

График, представленный на рисунке 2, позволяет проанализировать, как в зависимости от величины сжатия изменялась прочность материала, и даёт возможность оценить его механическое поведение в условиях статической сжимающей нагрузки. По мере сжатия образец демонстрирует пластическое упрочнение, за счёт чего достигается максимальная прочность 110,3 МПа. Это свидетельствует о высокой несущей способности, что подтверждает перспективность композита для применения в ответственных узлах при строительстве uWay.

Кроме того, на основании данного графика можно оценить жёсткость материала, характеризующуюся модулем Юнга [15]:

$$E = d\sigma / d\varepsilon, \qquad (1)$$

где E – модуль Юнга (в каждой точке кривой), Па;

$d\sigma$ – дифференциал нормального напряжения в материале, Па;

$d\varepsilon$ – дифференциал относительной упругой деформации образца.

Формула (1) описывает производную зависимость «напряжение – величина сжатия» по деформации, показывающую, как много дополнительного напряжения требуется для приращения деформации на 1 м.

В нашем случае модуль Юнга инкрементален при малых деформациях, т. е. увеличивается по мере сжатия образца. Это означает, что материал становится всё труднее сжимать – для каждого последующего микросмещения нужно всё большее напряжение. Таким образом, при повышенных напряжениях проявляется эффект упрочнения: по мере сжатия модуль Юнга возрастает, что соответствует увеличению жёсткости и улучшает сопротивляемость динамическим и ударным воздействиям, а также обеспечивает сохранение структурной целостности до достижения предельного состояния.

Опираясь на закономерность роста модуля Юнга, можно перейти к количественной оценке энергии, необходимой для разрушения образца. Работа на единицу площади до наступления разрушения определяется площадью под кривой [16]:

$$\frac{A}{S} = \int_0^l \sigma dl \approx \frac{1}{2} \times 875 \times 10^{-6} \times 110 \times 10^6 \approx 5 \times 10^4 \text{ Дж/м}^2, \qquad (2)$$

где A – работа, совершаемая при воздействии на площадь сечения S образца, Дж;

S – площадь сечения, м^2;

σ – прочность при сжатии, Па;

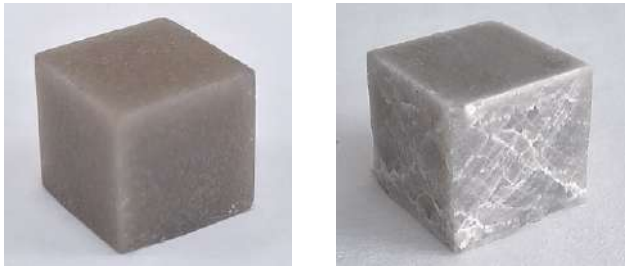
l – величина сжатия до разрушения материала, м.

Полученный результат, составляющий около 5×10^4 Дж/м^2, свидетельствует о способности материала поглощать существенные объёмы энергии до разрушения, что указывает на его высокую трещиностойкость и надёжность в условиях статических и динамических нагрузок.

Для сравнения: согласно данным [17] энергия разрушения зрелого бетона обычно равна 40–150 Дж/м^2, т. е. на два-три порядка ниже. Разница в значениях объясняется тем, что для бетона учитывается энергия только на образование трещины, поскольку он проявляет себя как хрупкий материал и разрушается практически без пластической деформации. Кварценаполненный композит, напротив, обладает вязкоупругими свойствами и развитой пластической зоной, поэтому поглощает энергию на всём протяжении нагружения, что и приводит к величинам, превышающим показатели бетона в сотни и даже тысячи раз.

Дополнительную информацию о характере деформации и механизмах разрушения материала позволяет

получить анализ внешнего вида образца после испытаний на сжатие (рисунок 3).



а) б)

Рисунок 3 – Испытываемый на сжатие образец с содержанием наполнителя 60 масс. %: а – до испытания; б – после испытания

На поверхности испытываемого кубика наблюдаются диагональные трещины с характерной ориентацией под углом к направлению нагрузки, что свойственно для сдвигового механизма разрушения. При этом тип повреждения не является хрупким – сохраняется геометрическая целостность без фрагментации материала. Несмотря на достижение предельного напряжения около 110 МПа, образец не распался на отдельные части, что свидетельствует о наличии остаточной пластичности материала и его способности поглощать механическую энергию без мгновенного хрупкого разрушения.

Дополнительно с целью оценки поведения образца под нагрузкой воспользуемся численным расчётом прочности модели композита методом конечных элементов в программной среде ANSYS 2024 R2 (рисунок 4).

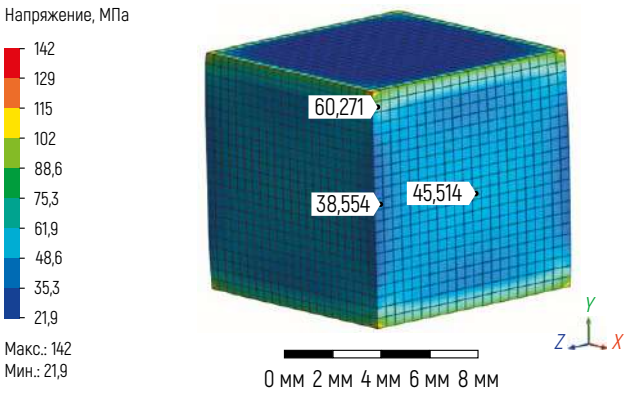


Рисунок 4 – Поле механических напряжений в образце во время нагрузки

Зона локализации разрушения приходится преимущественно на центральную часть образца и рёбра. Крестовидное разрушение, проявляющееся в центре, указывает на то, что в материале равномерно распределены нагрузки. Сдержанный тип трещинообразования, отсутствие сквозных расслоений и сохранение формы позволяют сделать вывод о высокой стойкости и способности материала сопротивляться разрушению даже при достижении предельной нагрузки.

Наибольшие значения эквивалентных напряжений локализуются в углах и на рёбрах кубика, что связано с геометрическими особенностями и краевыми эффектами. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными и подтверждают перспективность этого состава для применения в ответственных конструктивных элементах.

Показатели испытаний на растяжение, представленные на рисунке 5, отражают поведение материала при статическом нагружении: в начальной фазе композит, растягиваясь, упрочняется, достигая максимальной прочности 27,56 МПа при относительном удлинении около 2 %, после чего происходит его разрушение.

Умеренная прочность в сочетании с пластичностью обеспечивает оптимальный баланс между жёсткостью и гибкостью для долговечности конструкций.

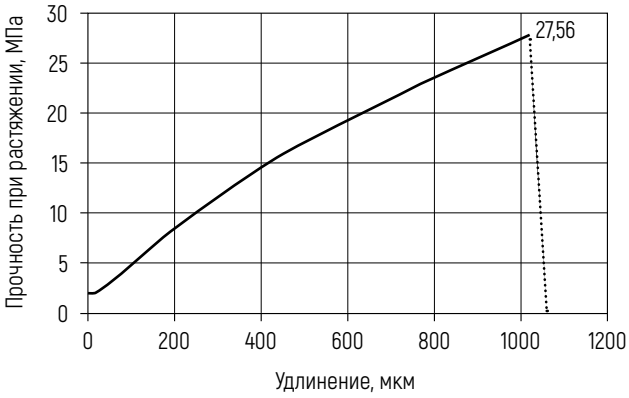


Рисунок 5 – Прочность при растяжении (скорость 5 мм/мин) для образца с наполнителем 60 масс. %

Преимущества использования эпоксидного композитного материала с пылевидным кварцем

Оптимизированный состав композита показал прочность при сжатии не менее 110 МПа, соответствующую

классам высокопрочных бетонных смесей по СТБ 1544-2005 [14]. При сравнении композита с бетонами классов С25–С40, широко используемыми в строительстве, видно, что для выдерживания одинаковых нагрузок его объём можно сократить в несколько раз: по отношению к С25 – примерно в четыре раза, а к С40 – практически в три. Дополнительно композит демонстрирует значительно более высокую прочность при растяжении. Это в сочетании со сниженной плотностью делает его довольно эффективным решением в отличие от традиционных бетонных материалов.

Кроме того, анализ себестоимости подтвердил, что разработанный компаунд способен конкурировать с традиционными материалами по экономическим показателям. Пылевидный кварц, применяемый в качестве основного компонента, производится филиалом Гомельского горно-обогатительного комбината ОАО «Гомельстекло» и поставляется по отпускной цене около 212 бел. руб/т (по состоянию на июль 2025 г. – около 70 USD/т). Эпоксидная смола, образующая связующую матрицу, при оптовых закупках обходится примерно в 6000 бел. руб/т (около 2000 USD/т). Поскольку доля вспомогательных компонентов не превышает 10 % рецептуры, расчётная себестоимость конечного компаунда – не более 3000 бел. руб/т (1000 USD/т). Так как для достижения требуемой прочности необходим меньший объём композита, а сам материал обладает рядом преимуществ, среди которых значительно более высокая прочность при растяжении, повышенная износостойкость, устойчивость к агрессивным воздействиям [11] и стабильность геометрических размеров, суммарные затраты на его применение оказываются оправданными и конкурентоспособными по сравнению с решениями, использующими традиционные бетоны. Важной является и технологическая простота: все компоненты можно поставлять и хранить раздельно, а приготовление рабочей смеси не нуждается в сложном оборудовании и может осуществляться непосредственно на строительной площадке с минимальными трудозатратами.

Заключение

Введение в эпоксидную матрицу 60 масс. % пылевидного кварца позволило получить материал, который сочетает высокую механическую прочность, устойчивость к растрескиванию и минимальную усадку. Благодаря значительно большей прочности при сжатии для достижения требуемой несущей способности необходимо меньше материала, что в сочетании с его меньшей плотностью по сравнению с бетоном обуславливает заметное снижение массы конструкций. Кроме того, существенным преимуществом является скорость набора прочности: состав полностью отвердевает менее чем за сутки, тогда как бетону для достижения проектной прочности нужно до 28 суток. Устойчивость к воздействию агрессивных сред подтверждена данными литературы, следовательно, композит пригоден для эксплуатации в сложных климатических условиях и при высокой влажности. Дополнительно компаунд обладает повышенной износостойкостью, что выводит его в число перспективных материалов для ответственных строительных узлов.

Совокупность полученных характеристик свидетельствует о долговечности кварценаполненного композита, а значит, о перспективности его применения при строительстве uWay, в частности взлётно-посадочной полосы (для посадки ОТС на скорости около 200 км/ч с использованием шасси), и крупных объектов в рамках программы uSpace, где важны надёжность, технологичность и экономическая эффективность, а также в других отраслях, предъявляющих особые требования к материалам.

Список основных источников

1. *Юницкий, А.Э. Союзное государство России и Беларуси как центр перезагрузки нового мира на биосферный путь цивилизационного развития / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы V междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 23–24 сент. 2022 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2023. – С. 16–55.*
2. *Юницкий, А.Э. Технология и механизация строительства наземных участков экваториальной эстакады общепланетарного транспортного средства / А.Э. Юницкий, Д.И. Бочкарёв // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 226–235.*
3. *Лубышев, Я.А. Применение композиционных материалов в строительстве / Я.А. Лубышев // Молодёжь и системная модернизация страны: сб. науч. ст. 5-й междунар. науч. конф. студентов и молодых учёных, Курск, 19–20 мая 2020 г.: в 6 т. / Юго-Запад. гос. ун-т [и др.]; отв. ред. А.А. Горохов. – Курск, 2020. – Т. 4. – С. 327–330.*

4. *Ерофеева, И.В. Биостойкость карбонатно-кварцевых композитов / И.В. Ерофеева // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 6. – С. 28–32.*
5. *Зарипова, Ф.К. Строительные материалы и изделия на основе эпоксидных полимеров / Ф.К. Зарипова, А.Р. Мустафина // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. – 2021. – № 1 (9). – С. 67–89.*
6. *Иржак, В.И. Эпоксидные полимеры и композиты с эпоксидной матрицей / В.И. Иржак. – М.: РАН, 2022. – 288 с.*
7. *Гаврилов, М.А. Особо плотные эпоксидные композиты на основе отходов производства / М.А. Гаврилов. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 132 с.*
8. *Термостабильные композиционные материалы / Е.Н. Сабадаха, Н.Р. Прокопчук, А.Л. Шутова, А.И. Глоба // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2017. – № 2 (199). – С. 108–115.*
9. *Шаповалов, В.М. Исследование свойств композиционных материалов на основе эпоксидной смолы, модифицированной наноструктурными силикаторганическими наполнителями / В.М. Шаповалов, И.И. Злотников // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 15-й междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию основания гос. науч. учреждения «Ин-т порошковой металлургии им. акад. О.В. Романа», Минск, 14–16 сент. 2022 г. – Минск, 2022. – С. 428–431.*
10. *Кочергин, Ю.С. Влияние дисперсных минеральных наполнителей на динамические механические свойства эпоксидных композиционных материалов / Ю.С. Кочергин, О.С. Попова, Т.И. Григоренко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 8. – С. 20–29.*
11. *Старокадомский, Д. Влияние микрочастиц кварцевого песка различного происхождения на физико-механические свойства эпоксидного композита для реставрационных, строительных и декоративных материалов / Д. Старокадомский, М. Решетник // Архивариус. – 2021. – Т. 7, № 4 (58). – С. 41–49.*
12. *Улегин, С.В. Эпоксидные компаунды, наполненные дисперсным минеральным наполнителем / С.В. Улегин, Ю.А. Кадыкова, А.В. Артемова // Молодой учёный. – 2015. – № 24 (104). – С. 53–54.*
13. *Мостовой, А.С. Эпоксидные композиты с повышенными эксплуатационными характеристиками, наполненные дисперсными минеральными наполнителями / А.С. Мостовой, А.С. Нуртазина, Ю.А. Кадыкова // Вестник ВГУИТ. – 2018. – № 3 (77). – С. 330–335.*
14. *Бетоны конструкционные тяжёлые. Технические условия = Бетоны канструкцыйныя цяжкія. Тэхнічныя ўмовы: СТБ 1544-2005. – Введ. 01.07.2005. – Минск: Госстандарт, 2005. – IV, 21 с.*
15. *Piaras, K. Plasticity / K. Piaras // Solid Mechanics. Part II: Engineering Solid Mechanics. – Chap. 8. – P. 241–354. – URL: https://pkel015.connect.amazon.auckland.ac.nz/SolidMechanicsBooks/Part_II/08_Plasticity/08_Plasticity_01_Introduction.pdf (date of access: 12.07.2025).*
16. *Basic Principles of Deformed Objects with Methods of Analytical Mechanics / J. Fu, C. Xiang, C. Yin [et al.] // Journal of Nonlinear Mathematical Physics. – 2024. – Vol. 31. – 57.*
17. *Dao, V.T.N. Fracture Mechanics of Early-Age Concrete / V.T.N. Dao, P.H. Morris, P.F. Dux // IA-FraMCoS. – URL: https://framcos.org/FraMCoS-7/01-14.pdf (date of access: 12.07.2025).*

uSPACE
01

УДК 635.8+629.7

Использование грибного мицелия для изготовления аналога кожи с целью применения в текстильной промышленности

И.В. Налетов

В.С. Заяц

П.А. Буглак

ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

При циклическом существовании замкнутых экосистем предусмотрено выращивание различных видов грибов в качестве питательной базы, а также для лекарственных целей и утилизации отходов. В данной статье рассмотрены способы применения базидиальных грибов (вёшенка обыкновенная (*Pleurotus ostreatus*), трутовик лакированный (*Ganoderma lucidum*)), симбиотической ферментационной культуры дрожжей и бактерий (чайный гриб (*Medusomyces gisevi*)) для изготовления аналога кожи и описана его финальная обработка для придания необходимых свойств. Для того чтобы полотно было плотным и гладким, на конечном этапе выполнялось покрытие глицерином и касторовым маслом.

Цель работы заключается в усовершенствовании технологии получения из грибов экологически чистого материала – аналога кожи – и адаптации методики для практического применения на орбите (в условиях замкнутой экосистемы ЭкоКосмоДома).

Проведены гистологические исследования плодовых тел выбранных культур грибов до и после щелочного воздействия. Проанализировано качество полученного биополотна. Для оценки обработки использовался фотометрический метод измерения общего количества сахаров, а также осуществлялось йодометрическое титрование для определения редуцирующих сахаров.

Ключевые слова:
аналог кожи, замкнутые экосистемы, переработка, чайный гриб (Medusomyces gisevi).

UDC 635.8+629.7

Use of Fungal Mycelium to Create Leather Alternative with the Aim of Application in Textile Industry

I. Naletov

V. Zayats

P. Buglak

Unitsky String Technologies Inc., Minsk, Belarus

In the context of cyclic existence within closed ecosystems, the cultivation of various mushroom species is intended for both nutritious purposes and medicinal applications, as well as waste disposal. This article explores the use of basidiomycete mushrooms (common oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*), lacquered polypore (*Ganoderma lucidum*)), symbiotic fermentation cultures of yeasts and bacteria (kombucha (*Medusomyces gisevi*)) for creating a leather alternative and describes its final processing to enhance desired properties. To achieve density and smoothness in the fabric, the final step involved treating it with glycerin and castor oil.

The aim of this work is to improve the technology for producing environmentally friendly material – leather alternatives – from mushrooms and to adapt the methodology for practical application in orbit (within the closed ecosystem of the EcoCosmoHouse).

Histological studies of the fruiting bodies of the selected mushroom cultures were conducted both before and after alkaline treatment. The quality of the resulting biotextile was analyzed. A photometric method was used to measure the total sugar content for processing evaluation, and iodometric titration was performed to determine reducing sugars.

Keywords:
closed ecosystems, kombucha (Medusomyces gisevi), leather alternative, processing.

Введение

В ходе освоения околоземного пространства моделирование биосферы планеты для обеспечения жизни человека на орбите привело к сближению космической биологии и экологии, что стало основой для разработки замкнутых искусственных экосистем. Космическую среду обитания можно рассматривать как экологическую систему людей, обменивающихся энергией, веществом и информацией. Для того чтобы понимать и контролировать процессы этого обмена, необходимо объединить ключевые экологические принципы со знаниями, полученными при изучении биорегенеративных систем жизнеобеспечения. Дальнейшие изыскания должны быть сосредоточены в первую очередь на автономном управлении экосистемой, замыкании углеродного цикла (производство продуктов питания и утилизация отходов), а затем на поддержании долгосрочной стабильности и надёжности. В данном исследовании основные разработки ведутся для замкнутой экосистемы ЭкоКосмоДома (ЭКД) [1, 2].

При циклическом существовании ЭКД предусмотрено выращивание различных видов грибов в качестве питательной базы, для лекарственных целей и утилизации отходов [3]. Для наиболее комплексного подхода и максимального включения имеющихся компонентов в циклические процессы, а также для удовлетворения всех потребностей человека и создания комфортных земных условий выращиваемые грибы могут применяться при изготовлении биополотна. На данный момент ткань производят из волокнистых структур растений (лён, хлопок и др.), часто используют шерсть животных или их кожу, химические волокна, полученные при размягчении целлюлозы и придании ей нитевидной формы. Среди альтернативных источников тканей или аналога кожи рассматриваются мицелий грибов или таллом симбиотических организмов бактерий и грибов (чайный гриб) [4, 5].

Ещё в средневековой Европе грибы использовали не только в пищу, но и как материал для изготовления одежды. Вымоченный в щёлочи трутовик обыкновенный служил для создания аналога кожи, который шёл в основном на производство тапочек и рукавиц. Поскольку полотно не обладало термоизоляцией, его сшивали с другими материалами (рисунок 1) [6].

Первым дизайнером, выпустившей целую коллекцию из грибной кожи, стала Сюзан Ли. Она высушила чайные грибы на манекене, получив бактериальную целлюлозу [7]. Сегодня многие модельеры по всему миру используют эту технологию. Например, корейская художница Сунг Енджу создаёт одежду из грибов и таких продуктов, как томаты и бананы. Однако её работы предназначены для привлечения внимания к проблеме ненатуральности материалов и демонстрируются только на выставках.

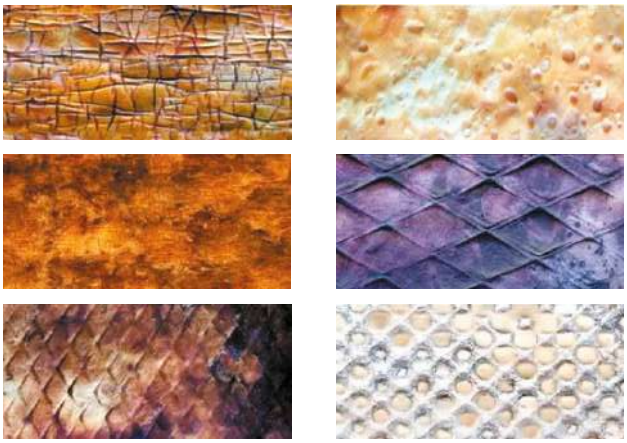


Рисунок 1 – Экокожа, полученная из мицелия трутовика обыкновенного (*Fomes fomentarius*)

В настоящем исследовании рассматриваются виды грибов, планируемые для культивирования в условиях замкнутой экосистемы ЭКД: вёшенка обыкновенная (*Pleurotus ostreatus*), трутовик лакированный (*Ganoderma lucidum*) и симбиотическая ферментационная культура дрожжей и бактерий – чайный гриб (*Medusomyces gisevi*), с целью проверки способности образовывать полотно – аналог кожи, а также возможности их внедрения в циклические процессы замкнутой экосистемы ЭКД.

Вёшенка обыкновенная является сапротрофом, в качестве источника энергии использует ферментативную целлюлозу деревьев, а на ранних стадиях – остатки сахаров во флоэме. Гриб развивается до трёх месяцев в древесине, а на четвёртый месяц формирует примордии и плодовые тела в течение примерно семи дней [8]. В древесине мицелий гриба распределяется рыхло и не пригоден в таком виде для производства аналога кожи. Однако при длительном выращивании мицелия на питательной среде гифы грибов сильно переплетаются и образуют плотный мицелий. При подобном подходе для искусственного культивирования требуются дополнительные площади, что становится одним из лимитирующих факторов в условиях замкнутых экосистем. В связи с этим в настоящем исследовании рассматривается применение плодового тела для выщелачивания и дальнейшего изготовления аналога кожи.

Трутовик лакированный вырабатывает при росте большое количество лигнина и хитина, что придаёт особую плотность мицелию. Данный базидиальный гриб является сапротрофом с аналогичным вёшенке типом питания. Кроме того, высокое содержание хитина в базидиокарпии – существенное основание при выборе этого гриба для разработки новых устойчивых биоматериалов [9].

Чайный гриб, или комбуча, – симбиотический организм, у которого таллом способен разрастаться на всю поверхность, где есть питательные компоненты. Закваска состоит из молочнокислых и уксуснокислых бактерий в симбиозе с дрожжами. Культура обычно включает аэробные грамотрицательные (*Acetobacter*, *Gluconobacter* и *Komagataeibacter*) и аэробные грамположительные (*Lactobacillus*) виды, а также различные дрожжи (*Saccharomyces* и *Zygosaccharomyces*) [10]. В наиболее распространённой форме она представляет собой желатиновую биоплёнку на основе целлюлозы или микробный мат, плавающий на границе раздела воздуха и жидкости в ёмкости с питательной средой. Дрожжи в составе ассоциации ферментируют сахара, такие как глюкоза из чёрного или зелёного чая, в этанол и углекислый газ.

В настоящее время изготовление грибной кожи рассматривается преимущественно в контексте декоративного применения и креативного дизайна. Изучение возможности усовершенствования и внедрения данной технологии в циклические процессы замкнутых экосистем является актуальным направлением. Интеграция методики получения и использование аналога кожи из грибов создаст условие для ещё одного циклического процесса в экосистеме, а также позволит проживающим в ЭКД удовлетворять потребности в текстильной продукции. При этом биокожа при утилизации может выступить компонентом в производстве органических подкормок для растений.

В связи с изложенным цель работы заключается в усовершенствовании технологии получения из грибов экологически чистого материала – аналога кожи – и адаптации методики для практического применения на орбите.

Материалы и методы исследования

Для производства мицелия базидиальных грибов (вёшенка обыкновенная, трутовик лакированный) использовался субстрат из льнотресты, которую подвергали варке в течение 1 ч в воде. Затем органическую часть отделяли от воды и фасовали по ёмкостям, содержащим мицелий гриба. Ёмкости герметизировали и помещали в климатический бокс, где поддерживались следующие условия: температура воздуха 18 °C, влажность 89 %, отсутствовало освещение. После разрастания мицелия гриба на 70 % объёма субстрата в блоке производили надрезы для транспирации воздуха с целью дальнейшего формирования плодовых тел.

Симбиотическую ферментационную культуру дрожжей и бактерий получали путём поверхностного культивирования в жидкой питательной среде, состоящей из концентрата листового чёрного чая, глюкозы (20 г/л), сахарозы (20 г/л). Инкубация проводилась при 24 °C в течение одной недели.

После сбора плодовые тела грибов и таллом симбиотической закваски погружали в 10 % NaOH на 24 ч для изменения структуры гриба и придания дополнительных свойств прочности (деацетилирование хитина), далее осуществлялись промывка и сушка при температуре 60 °C в течение 5 ч. Данную заготовку аналога кожи пропитывали глицерином и касторовым маслом, затем высушивали при температуре 60 °C в течение 1 ч. По завершении обработки плодовые тела гриба прессовали для придания текстильной формы.

Исходные образцы гриба, а также их варианты после щелочной обработки подвергались гистологическому анализу. Окраска препаратов выполнялась карболовым фуксином Циля. Микроскопирование проводилось при 100-кратном увеличении окуляра микроскопа BestScope BS-2022B.

Для оценки обработки использовался фотометрический метод измерения общего количества сахаров, а также осуществлялось йодометрическое титрование для определения редуцирующих сахаров.

Результаты исследования

Гистологическое изучение структуры грибов проводилось по результатам окрашивания хитина клеток и визуального анализа их пористости (рисунок 2).

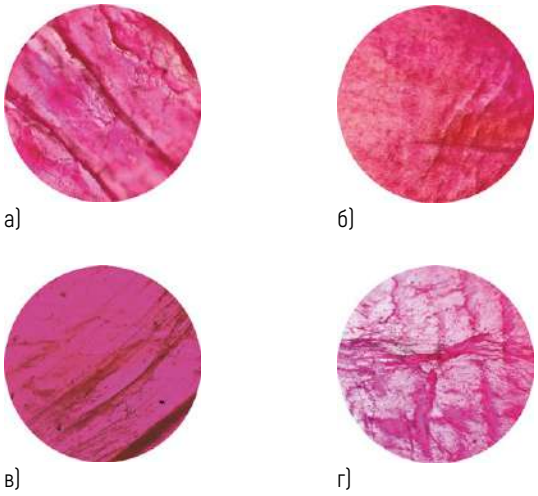


Рисунок 2 – Гистологическое исследование грибов до и после экстракции 10 % NaOH:
а – исходный образец вёшенки обыкновенной;
б – образец вёшенки обыкновенной после обработки;
в – исходный образец чайного гриба;
г – образец чайного гриба после обработки

Обработка грибов при помощи 10 % NaOH приводила к вымыванию части сахаров из структур клеток (рисунки 2б, 2г), клетки оставались закрытыми с большой частью сахаров внутри, о чём свидетельствует биохимический анализ (таблица). После повторной экстракции грибов щёлочью структуры тканей имеют большие полости с явными признаками вымывания сахаров из клеток.

Таблица – Анализ содержания сахаров в образцах после щелочной обработки

Вид гриба	Стадия экстракции	Количество сахаров, % от сухой массы	
		Общее содержание	Редуцирующие сахара
Вёшенка обыкновенная	Первая	4,8	1,2
	Вторая	1,3	0,1
Трутовик лакированный	Первая	1,2	0,8
	Вторая	0,4	<0,05
Чайный гриб	Первая	1	1
	Вторая	0,2	0,2

В плодовых телах вёшенки обыкновенной преимущественно преобладают следующие сахара: трегалоза (до 60 %), маннитол (25 %), глюкоза (8 %). Двукратная экстракция гидроксидом натрия уменьшала количество сахаров в структурах этого гриба. Трутовик лакированный содержит полисахариды (β-глюканы) – до 80 %, что делает его структуру плотной. Их снижение у данного вида затруднительно, поскольку клетки закрыты лигнином и хитином, что предотвращает вымывание гликогена. Ткани чайного гриба изначально включают небольшое количество сахаров: поскольку культура является симбиотической, то основная масса углеводов может находиться в межклеточном пространстве между слоями, что обуславливает быструю миграцию сахаров из тканей.

В процессе щелочного воздействия происходит изменение содержания хитина в грибном мицелии, чем обеспечиваются новые свойства. Деацетилирование хитина, которое также достигается во время щелочной обработки, высвобождает аминогруппы, способствующие образованию дополнительных участков сшивания на основной структуре хитозана в мицелии.

После сушки грибная кожа приобрела более устойчивую структуру, чем заменители кожи из синтетических полимеров (ПУ и ПВХ), и свойства, сопоставимые с кожей животных (рисунок 3).

Рисунок 3 – Уплотнённый мицелий чайного гриба после экстракции и сушки на матерчатой подложке

Экстрагированный мицелий вёшенки обыкновенной после высушивания не приобрёл плотной структуры и стал более ломким. Мицелий трутовика лакированного, напротив, содержит слишком большое количество β-глюканов, что не позволяет в условиях выбранной методики добиться эластичной структуры, подобной коже. Для этого требуется большее количество времени, а также многоступенчатая предварительная обработка, однако имеется потенциальная возможность создания жёстких износостойких материалов.

Чайный гриб в рамках проведённого эксперимента продемонстрировал оптимальные показатели по простоте и эффективности получения кожеподобного материала. После экстракции, уплотнения и сушки он проявил более устойчивые формы мицелия и может быть использован в дальнейшем для изучения свойств аналога кожи из грибов.

Заключение

Мицелий различных грибов, перерабатывающих сельскохозяйственные и лесные побочные продукты в хитиновые полимеры и другие полисахариды, является потенциальным источником экоматериалов для применения в условиях замкнутых экосистем. Хитиновые полимерные маты успешно подвергаются физической и химической модификации для производства тканей, которые визуально и на ощупь напоминают как бычью, так и синтетическую кожу, а также демонстрируют сопоставимые механические и тактильные свойства.

Лучшими характеристиками в рамках проведённого исследования обладает стабилизированный аналог кожи,

изготовленный из чайного гриба. В дальнейшем предполагается его использование для создания композиционных тканей. Помимо этого, мицелию можно придавать необходимую форму путём выращивания гриба в ёмкостях выбранного размера и конфигурации.

Вёшенка обыкновенная и трутовик лакированный также подходят для получения биоматериалов, но с другими свойствами. Так, трутовик лакированный имеет прочную структуру с высоким содержанием лигнина и может служить для производства особо прочных материалов, однако технология должна включать многоступенчатую обработку. В вёшенке присутствует большое количество углеводов, с помощью которых она формирует свою структуру. При их удалении ткани становятся менее прочными. Для применения данного гриба в качестве экокожи следует рассмотреть создание композитных материалов, дополненных волокнами целлюлозы или вискозы.

В ЭКД изготовление заменителя кожи позволит не только удовлетворить потребность в данном материале, но и избавиться от больших площадей для выращивания животных, устранить масштабные загрязнения продуктами их жизнедеятельности. Кроме того, производство такого биополотна способствует уменьшению экологической нагрузки, связанной с утилизацией использованной одежды.

Список основных источников

1. *Юницкий, А.Э. Программа «Экомир» / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 24–77.*
2. *Буглак, П.А. Выращивание мицелия базидиальных грибов на органических субстратах в условиях замкнутой экосистемы / П.А. Буглак, В.С. Заяц, И.В. Налетов // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы V междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 23–24 сент. 2022 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2023. – С. 242–249.*
3. *Буглак, П.А. Экологическая утилизация органических остатков растениеводства с помощью Pleurotus ostreatus / П.А. Буглак, В.С. Заяц // Сахаровские чтения 2024 года: экологические проблемы XXI века: материалы 24-й междунар. науч. конф., Минск, 23–24 мая 2024 г.: в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, УО «Междунар. гос. эколог. ин-т им. А.Д. Сахарова» Белорус. гос. ун-та; редкол.: А.Н. Батян [и др.]; под общ. ред. О.И. Родькина, М.Г. Герменчук. – Минск, 2024. – Ч. 2. – С. 87–90.*
4. *Заяц, В.С. Протекторная способность экзогенных элиситоров из Ganoderma lucidum при индукции солевого стресса у кресс-салата / В.С. Заяц, И.В. Налетов, Е.А. Крюков // Настоящее и будущее биотехнологии растений: материалы междунар. науч. конф., посвящ. 65-летию деятельности отд. биохимии и биотехнологии растений ГНУ «Централ. ботан. сад НАН Беларуси», Минск, 24–26 мая 2023 г. / НАН Беларуси, Отд-ние биолог. наук [и др.]; редкол.: В.Н. Решетников [и др.]. – Минск, 2023. – С. 75.*
5. *Alkali-Soluble Polysaccharides from Mushroom Fruiting Bodies Improve Insulin Resistance / S. Yang, J. Yan, L. Yang [et al.] // International Journal of Biological Macromolecules. – 2019. – Vol. 126. – P. 466–474.*
6. *Guillén, J. Influence of Alkali and Alkaline Earth Elements on the Uptake of Radionuclides by Pleurototus eryngii Fruit Bodies / J. Guillén, A. Baeza, A. Salas // Applied Radiation and Isotopes. – 2012. – Vol. 70, iss. 4. – P. 650–655.*
7. *An Alkaline Protease from Fresh Fruiting Bodies of the Edible Mushroom Pleurotus citrinopileatus / L. Cui, Q.H. Liu, H.X. Wang, T.B. Ng // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2007. – Vol. 75, iss. 1. – P. 81–85.*
8. *Fungal Mycelium as Leather Alternative: A Sustainable Biogenic Material for the Fashion Industry / A. Amobonye, J. Lalung, M.K. Awasthi, S. Pillai // Sustainable Materials and Technologies. – 2023. – Vol. 38. – e00724.*
9. *Leather-Like Material Biofabrication Using Fungi / M. Jones, A. Gandia, S. John, A. Bismarck // Nature Sustainability. – 2021. – Vol. 4. – P. 9–16.*
10. *Fungal Textile Alternatives from Bread Waste with Leather-Like Properties / E.R. Kanishka, B. Wijayarathna, G. Mohammadkhani [et al.] // Resources, Conservation and Recycling. – 2022. – Vol. 179. – 106041.*

УДК 524.83+629.7

Искривление пространственно-временного континуума как способ гиперпространственных перемещений согласно теории Гипервселенной

Р.В. Хачатуров
член-корреспондент Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, кандидат физико-математических наук

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Россия

Цель работы – теоретические исследования возможности принципиально новых (гиперпространственных) способов перемещения в пространстве и времени нашей и параллельных вселенных.

Представлены основные положения теории Гипервселенной, описывающей нашу и параллельные вселенные как трёхмерные гиперповерхности четырёхмерных шаров, движущиеся по четырёхмерной гиперповерхности пятимерного тора Гипервселенной, циклически изменяя свой размер. Получены законы периодического изменения их радиуса, скорости и ускорения расширения/сжатия. Движение параллельных вселенных по пятимерному тору Гипервселенной объясняет такие наблюдаемые астрофизические явления, как ускоренное в данный момент времени расширение Вселенной, пространственное расположение квазаров и их джетов в крупномасштабной структуре Вселенной, природу гравитации.

На основании теории Гипервселенной рассмотрена топологическая структура многомерного пространства-времени. Показано, что для перемещения в нём может быть использовано локальное искривление пространственно-временного континуума нашей Вселенной. Такое перемещение в будущем способно обеспечить межзвёздное путешествие на космическом Ковчеге в рамках миссии цивилизационной панспермии.

Ключевые слова:
искривление пространства, космология, математическое моделирование, многомерное время, теория Гипервселенной.

UDC 524.83+629.7

Curvature of the Space-Time Continuum as a Means of Hyperspatial Travel According to Hyperuniverse Theory

R.V. Khachaturov
Corresponding Member
of the Russian Academy
of Cosmonautics
named after K.E. Tsiolkovsky,
Ph.D. in Physical
and Mathematical Sciences

Federal Research Center
"Computer Science and Control"
of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

The aim of the work is to conduct theoretical research into the possibility of fundamentally new (hyperspatial) methods of movement in space and time in our Universe and parallel universes.

This paper presents the core principles of the Hyperuniverse theory, which describes our Universe and parallel universes as three-dimensional hypersurfaces of four-dimensional spheres, moving along the four-dimensional hypersurface of the five-dimensional torus of the Hyperuniverse while cyclically varying in size. The laws governing the periodic changes in their radius, velocity, and acceleration of expansion and contraction have been derived. The motion of parallel universes along the five-dimensional torus of the Hyperuniverse accounts for several observed astrophysical phenomena, including the currently accelerated expansion of the Universe, the spatial distribution of quasars and their jets within the large-scale structure of the Universe, and the nature of gravity.

Building on the Hyperuniverse theory, the article examines the topological structure of multidimensional space-time. It is demonstrated that the local curvature of the space-time continuum in our Universe can facilitate movement within it. Such advancements may one day enable interstellar travel aboard a space Ark as part of a civilizational panspermia mission.

Keywords:
cosmology,
Hyperuniverse theory,
mathematical modeling,
multidimensional time,
space curvature.

Введение

Гипервселенная – вращающийся пятимерный тор (рисунок 1), по которому движется наша Вселенная, периодически изменяя свой размер [1–5].

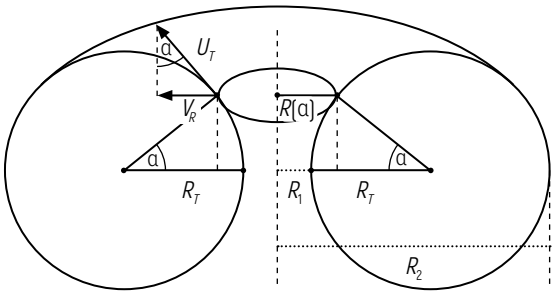


Рисунок 1 – Трёхмерная схема многомерного тора Гипервселенной в разрезе

На рисунке 1 приведены следующие обозначения:

- $R_1 \approx 4{,}7$ млрд световых лет и $R_2 \approx 44{,}7$ млрд световых лет – внутренний и внешний радиусы тора соответственно;
- $R_T \approx 20$ млрд световых лет – радиус тела («трубки») тора;
- $\alpha = C \times t/R_T \approx 14{,}6/20 \approx 0{,}73$ рад – угол, на который наша Вселенная успела провернуться вдоль поверхности пятимерного тора Гипервселенной за время $t = t_0 \approx 14{,}6$ млрд световых лет от начала периода расширения; $C = U_T$ – скорость света, с которой наша Вселенная (и параллельные ей) движется по пятимерному тору Гипервселенной, или линейная скорость вращения четырёхмерной гиперповерхности этого тора. В используемых единицах измерения (млрд световых лет/млрд лет) $C = 1$;
- $R(\alpha) = R(t) = R_1 + R_T(1 - \cos(C \times t/R_T))$ – радиус нашей Вселенной в данный момент времени t;
- $V_R = R'(t) = C\sin(C \times t/R_T)$ – скорость расширения (увеличения радиуса) нашей Вселенной в зависимости от времени t и параметров тора.

Согласно теории Гипервселенной [1–5] наша Вселенная представляет собой трёхмерную гиперповерхность четырёхмерного шара (гиперсферу) радиусом около 10 млрд световых лет и объёмом

$$W_U = W_{S^3} = 2\pi^2 R(t)^3 \approx 20\ 000 \text{ (миллиардов световых лет)}^3,$$

где W_{S^3} – объём трёхмерной сферы (или трёхмерной гиперповерхности четырёхмерного шара).

Вселенная расширяется по обобщённому закону Хаббла:

$$V = K(t)D,$$

где $K(t)$ – функция Хачатурова:

$$K(t) = \frac{R'(t)}{R(t)} = \frac{C\sin(C \times t/R_T)}{R_1 + R_T(1 - \cos(C \times t/R_T))};$$

D – расстояние между объектами во Вселенной.

Размеры пятимерного тора Гипервселенной приближенно определены на основании многочисленных астрономических и астрофизических данных [6–14]. В соответствии с теорией Гипервселенной можно предполагать, что время, в котором он движется, топологически эквивалентно четырёхмерному тору и представляет собой трёхмерную гиперповерхность четырёхмерного тора Времени. Отметим, что при создании космологической теории Гипервселенной использовался большой научный опыт автора в математическом моделировании различных проблем и процессов [15–19]. Это позволило построить математическую модель, учитывающую самые современные астрономические и астрофизические данные о нашей Вселенной.

Математическое моделирование и применение численных методов решения прикладных задач становятся ключевым инструментом в условиях усложнения и масштабирования комплексных исследований по освоению космоса. Важную роль в этом процессе играют не только государственные, но и коммерческие организации. Ярким примером служат компании под руководством А.Э. Юницкого [20–22], разрабатывающие технологии для промышленного освоения околоземного пространства и строительства орбитальной индустриальной инфраструктуры (космическое индустриальное ожерелье «Орбита»), а также для осуществления межзвёздных полётов с целью экспансии человечества и земной жизни в дальний космос.

На рисунке 2 показана структура нашей Вселенной в крупном масштабе (размер рисунка по горизонтали соответствует примерно 7 млрд световых лет), полученная по результатам современных астрофизических наблюдений и измерений в широком диапазоне частот [6].

Такую сложную неоднородную ячеистую структуру невозможно полноценно объяснить теорией Большого взрыва (ТБВ), в основе которой лежит ничем не подтверждённое предположение о взрыве некой сверхплотной сингулярности, поскольку эта гипотетическая сингулярность должна была бы быть абсолютно однородной. ТБВ также не даёт никаких объяснений того, как и откуда могла появиться

такая сингулярность, почему она вдруг взорвалась, почему этот взрыв продолжается уже около 14 млрд лет, откуда в этой сингулярности взялось столько энергии, что наша Вселенная расширяется по закону Хаббла весь этот период и с дополнительным положительным ускорением в настоящее время. В отличие от ТБВ теория Гипервселенной [1–5] не содержит внутренних ошибок и противоречий и с математической точностью описывает все наблюдаемые астрономические и астрофизические явления и процессы во Вселенной [6–14], а также даёт точный прогноз того, что с ней будет происходить в любой момент.

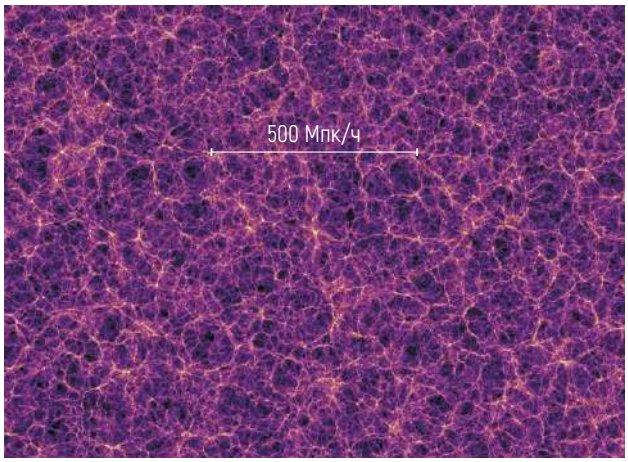


Рисунок 2 – Крупномасштабная структура Вселенной

Проблематика и цель данной работы – теоретические исследования возможности принципиально новых (гиперпространственных) способов перемещения в пространстве и времени нашей и параллельных вселенных, циклически движущихся согласно описанным в теории Гипервселенной законам по пятимерному тору Гипервселенной в четырёхмерном торе Времени.

Топология и динамика пространственно-временного континуума Гипервселенной

Компьютерное моделирование движения пятимерного тора Гипервселенной по трёхмерной гиперповерхности четырёхмерного тора Времени (рисунок 3) на основании теории Гипервселенной показывает, что радиус кривизны четырёхмерного тела тора Времени должен составлять несколько периодов собственного вращения пятимерного тора Гипервселенной (т. е. иметь величину около триллиона лет) [1–5]. Суммируя размерности тора Гипервселенной и тора Времени (пять пространственных и четыре временных), получаем, что общая размерность пространственно-временного континуума, в котором пятимерный тор Гипервселенной (изображён зелёным цветом) движется по трёхмерной гиперповерхности четырёхмерного тора Времени (изображён синим цветом), равна 9.

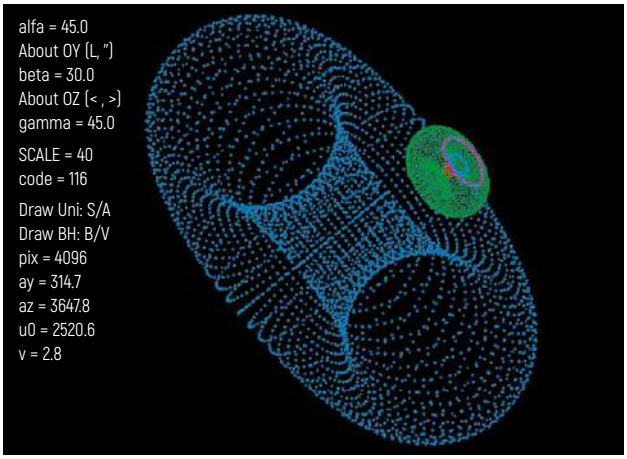


Рисунок 3 – Кадр из компьютерной программы, иллюстрирующий движение пятимерного тора Гипервселенной по четырёхмерному тору Времени

Отметим, что на рисунке 3 для облегчения восприятия редуцированы две пространственные координаты и одна временная, а также совмещены пространственные и временные координаты, которые в действительности раздельны.

Использование локального искривления пространства для гиперпространственных перемещений

Если найти способ локально искривлять пространство-время нашей Вселенной, то в соответствии с теорией Гипервселенной это можно будет применять для практически мгновенных перемещений в пространстве и времени [1–5].

На рисунках 4 и 5 представлена компьютерная иллюстрация отделения от нашей Вселенной локально искривлённой области пространственно-временного континуума.

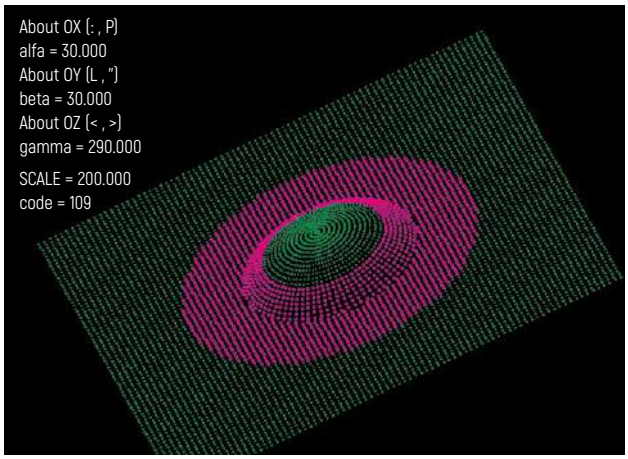


Рисунок 4 – Начало локального искривления пространства Вселенной

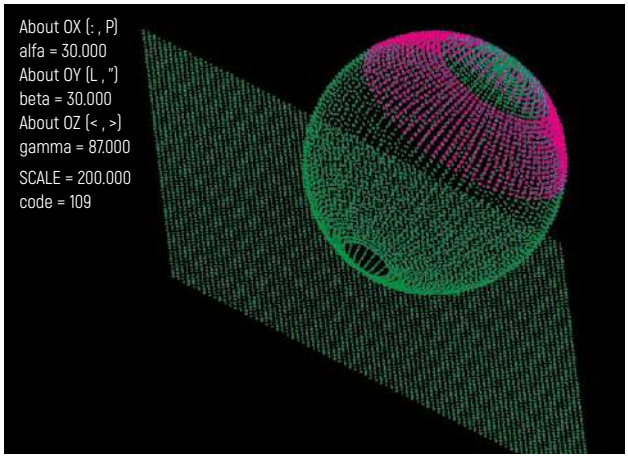


Рисунок 5 – Отделение искривлённой области пространства от Вселенной

Внутри локально искривлённой области пространства можно поместить аппарат (звездолёт, машина времени), содержащий всё необходимое для обеспечения жизнедеятельности экипажа, различное оборудование и другой полезный груз. Для этих целей прекрасно подходит такое уникальное космическое сооружение с биосферной замкнутой экосистемой, как космический Ковчег (ЭКД-Ковчег), описанный в работах А.Э. Юницкого [22]. В соответствии с теорией Гипервселенной при достаточно сильном искривлении из локально искривлённой области пространства образуется мини-вселенная – трёхмерная гиперсфера, включающая в себя сам аппарат и весь полезный груз (на рисунках 4, 5 показано фиолетовым цветом).

Заключение

Представленная в статье теория предполагает, что мини-вселенные будут отделяться от пространственно-временного континуума Вселенной, перемещаться в гиперпространстве в нужную точку пространства и времени, не встречая препятствий в виде релятивистских ограничений по скорости, массе, встречных объектов (космические газопылевые облака, метеориты, кометы, планеты, звёзды и др.), и затем вливаться в пространственно-временной континуум в выбранной точке. Таким образом, если найти способ локально искривлять пространство-время, то можно выполнять практически мгновенные неразрушающие перемещения любых материальных объектов (в том числе и живых) через гиперпространство на любые расстояния, как по пространству, так и по времени. Это позволит осуществлять межзвёздные путешествия в рамках миссии цивилизационной панспермии, например с помощью космических сооружений с биосферной замкнутой экосистемой – ЭКД-Ковчегов.

Список основных источников

1. *Хачатуров, Р.В. Пятимерная модель Гипервселенной и возможные этапы освоения космического пространства / Р.В. Хачатуров // Актуальные проблемы российской космонавтики: тр. XXXV академ. чтений по космонавтике, Москва, 25–28 янв. 2011 г. / Рос. акад. наук [и др.]; под общ. ред. А.К. Медведева. – М., 2011. – С. 277–278.*
2. *Хачатуров, Р.В. Математическая модель Гипервселенной и её применение для оценки возможностей освоения космического пространства / Р.В. Хачатуров // Гагаринский сборник: материалы XXXVIII обществ.-науч. чтений, посвящ. памяти Ю.А. Гагарина, Гагарин, 10–12 марта 2011 г. / Ин-т истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН [и др.]; редкол.: А.А. Леонов (пред.) [и др.]. – Воронеж, 2011. – С. 414–425.*
3. *Khachaturov, R.V. Theoretical Possibility of Transferring Matter Between Parallel Universes in Accordance with the Hyperuniverse Theory / R.V. Khachaturov // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2171. – 090001.*
4. *Khachaturov, R.V. General Structure of Multidimensional Closed Time from the Hyperuniverse Theory Point of View / R.V. Khachaturov // AIP Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 2318. – 080003.*
5. *Khachaturov, R.V. The Galaxies Life Cycle According to the Hyperuniverse Theory / R.V. Khachaturov // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2549. – 090003.*

6. *Simulating the Joint Evolution of Quasars, Galaxies and Their Large-Scale Distribution / V. Springel, S.D.M. White, A. Jenkins [et al.] // Cornell University. – URL: https://arxiv.org/abs/astro-ph/0504097 (date of access: 27.05.2025).*
7. *Kraken Reveals Itself – The Merger History of the Milky Way Reconstructed with the E-MOSAICS Simulations / J.M.D. Kruijssen, J.L. Preffer, M. Chevance [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2020. – Vol. 498, iss. 2. – P. 2472–2491.*
8. *Melia, F. Cosmological Test Using the Hubble Diagram of High-z Quasars / F. Melia // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2019. – Vol. 489, iss. 1. – P. 517–523.*
9. *John, M.V. R_h = ct and the Eternal Coasting Cosmological Model / M.V. John // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2019. – Vol. 484. – P. L35–L37.*
10. *Early-Type Host Galaxies of Type Ia Supernovae. II. Evidence for Luminosity Evolution in Supernova Cosmology / Y. Kang, Y.-W. Lee, Y.-L. Kim [et al.] // The Astrophysical Journal. – 2020. – Vol. 889, iss. 1. – 8.*
11. *Hoof, S. A Global Analysis of Dark Matter Signals from 27 Dwarf Spheroidal Galaxies Using 11 Years of Fermi-LAT Observations / S. Hoof, A. Geringer-Sameth, R. Trotta // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. – 2020. – Iss. 2. – 012.*
12. *Space Densities and Emissivities of Active Galactic Nuclei at z > 4 / E. Giallongo, A. Grazian, F. Fiore [et al.] // The Astrophysical Journal. – 2019. – Vol. 884, iss. 1. – 19.*
13. *Shao, X. Curvature-Induced Polarization and Spectral Index Behavior for PKS 1502 + 106 / X. Shao, Y. Jiang, X. Chen // The Astrophysical Journal. – 2019. – Vol. 884, iss. 1. – 15.*
14. *Eckhardt, D.H. Dark Future for Dark Matter / D.H. Eckhardt, J.L. Garrido Pestaña // Journal of Modern Physics. – 2020. – Vol. 11, No. 10. – P. 1589–1597.*
15. *Андреев, А.В. Самофокусировка импульсного рентгеновского излучения в плазме / А.В. Андреев, Р.В. Хачатуров // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. – 1995. – Т. 36, № 3. – С. 25–33.*
16. *Хачатуров, Р.В. Вычислительный метод исследования процесса самофокусировки рентгеновского излучения в плазме / Р.В. Хачатуров // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1996. – Т. 36, № 1. – С. 103–111.*
17. *Хачатуров, Р.В. Математическое моделирование самофокусировки осесимметричных рентгеновских импульсов в плазме / Р.В. Хачатуров // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1999. – Т. 39, № 12. – С. 2086–2097.*
18. *Хачатуров, Р.В. Прямая и обратная задачи исследования процесса самофокусировки рентгеновских импульсов в плазме / Р.В. Хачатуров // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2020. – Т. 60, № 2. – С. 323–337.*
19. *Хачатуров, Р.В. Обобщённый метод множества эквивалентности для решения задач многокритериальной оптимизации / Р.В. Хачатуров // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2020. – № 1. – С. 109–118.*
20. *Юницкий, А.Э. Особенности проектирования жилого космического кластера «ЭкоКосмоДом» – миссия, цели, назначение / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 51–57.*
21. *Юницкий, А.Э. Программа «ЭкоМир» / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 24–77.*
22. *Юницкий, А.Э. Внеземные инженерные цивилизации и космическая цивилизационная панспермия / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 406–425.*

УДК 621.311.25+629.7

Газотурбинные установки для энергоснабжения космодромов: внедрение программного комплекса «A2GTP»

М.О. Савельев

Ю.В. Матвеев
кандидат технических наук

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия

Обоснована необходимость применения программного комплекса «A2GTP» (ПК A2GTP) при моделировании функционирования газотурбинных установок (ГТУ) для энергоснабжения космодромов. Целью исследования является не только подтверждение возможности точного прогнозирования рабочих характеристик ГТУ с помощью ПК A2GTP, но и демонстрация его потенциала в качестве инструмента для оптимизации режимов работы ГТУ и повышения эффективности систем энергоснабжения космической отрасли.

При сравнении результатов моделирования с фактическими данными при различных температурах на входе в турбину выявлено, что для ключевых параметров ГТУ относительное отклонение составило менее 2 %. Такой показатель, обусловленный расчётными приближениями и методологическими факторами, свидетельствует о надёжности комплекса.

Исследование доказывает, что ПК A2GTP способен точно прогнозировать динамическое поведение ГТУ и оперативно оценивать влияние входных параметров, что делает его ценным инструментом для проектирования, анализа и оптимизации систем энергоснабжения космодромов на базе ГТУ.

Ключевые слова:
газотурбинная установка (ГТУ), динамическое поведение, моделирование ГТУ, модель, наземное применение ГТУ, программа расчёта, расчётный комплекс, система энергоснабжения.

UDC 621.311.25+629.7

Gas Turbine Units for Power Supply of Spaceports: Implementation of A2GTP Software Package

M. Saveliev

Y. Matveev
Ph.D. in Engineering Sciences

Peter the Great
St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia

The necessity of applying the A2GTP software package (A2GTP SP) in modeling the operation of gas turbine units (GTU) for power supply of spaceports is substantiated. The aim of the study is not only to confirm the possibility of accurately predicting GTU performance characteristics using the A2GTP SP, but also to demonstrate its potential as a tool for optimizing GTU operating modes and improving the efficiency of power supply systems in the space industry.

A comparison of simulation results with actual data at various turbine inlet temperatures revealed that the relative deviation for key GTU parameters was less than 2 %. This indicator, attributable to computational approximations and methodological factors, confirms the reliability of the software package.

The study proves that the A2GTP SP is capable of accurately predicting the dynamic behavior of GTU and promptly assessing the influence of input parameters, making it a valuable tool for the design, analysis, and optimization of GTU-based power supply systems for spaceports.

Keywords:
calculation program, computational package, dynamic behavior, gas turbine unit (GTU), ground application of GTU, GTU modeling, model, power supply system.

Введение

Космическая деятельность, являясь символом научно-технического прогресса и открывая перед человечеством новые горизонты, выдвигает чрезвычайно высокие требования к надёжности и стабильности всех сопутствующих процессов [1, 2]. Один из главных аспектов обеспечения успешности космических миссий – бесперебойное электроснабжение наземной инфраструктуры, включающей космодромы и центры управления полётами. В данном контексте газотурбинные установки (ГТУ) играют особую роль, выступая в качестве как основных, так и резервных источников энергии.

Моделирование работы ГТУ – необходимый инструмент для организации энергоснабжения космодромов, поскольку затрагивает вопросы надёжности, эффективности и безопасности. Это связано с тем, что космодромы и центры управления полётами представляют собой сложные технологические комплексы, функционирующие в режиме 24/7, и любые перебои в электроснабжении могут привести к остановке критически важных процессов, таких как:

- подготовка ракет-носителей к запуску: заправка топливом, проверка бортовых систем, предстартовая диагностика и другие операции требуют бесперебойного электропитания;
- контроль и управление полётами космических аппаратов: центры управления полётами осуществляют мониторинг телеметрии, передачу команд управления и анализ данных, поступающих с космических аппаратов;
- работа систем связи и навигации: надёжная связь с космическими аппаратами и точная навигация жизненно необходимы для успешного выполнения миссий;
- функционирование систем жизнеобеспечения: поддержание комфортных условий для сотрудников космодромов и центров управления полётами также требует бесперебойного электроснабжения.

В случае перебоев могут возникнуть аварийные ситуации, представляющие угрозу для безопасности персонала и дорогостоящего оборудования [2]. Например, внезапное отключение электропитания систем охлаждения способно привести к перегреву и выходу из строя электронных компонентов.

Важность надёжного автономного энергоснабжения возрастает в контексте новых космических проектов, таких как программа безракетного освоения ближнего космоса uSpace, развиваемая инженером А.Э. Юницким [3]. В частности, при функционировании экваториального линейного города (ЭЛГ), концептуально связанного с этим проектом, непременно возникнет потребность в экологически чистых источниках энергии и ГТУ, использующих природное топливо.

Преимущества применения ГТУ для энергоснабжения центров управления полётами и космодромов (а в будущем – общепланетарного транспортного средства (ОТС), ЭЛГ и систем взлётно-посадочной эстакады ОТС) определены высокой надёжностью и быстротой запуска. Такие установки сразу же включаются в работу, что имеет решающее значение в аварийных ситуациях. Современные ГТУ могут быть запущены в течение нескольких минут, обеспечивая оперативное восстановление электроснабжения. Они способны функционировать и в автономном режиме, независимо от внешних источников электроэнергии. Это особенно важно для объектов, расположенных в отдалённых районах, где вероятны проблемы с подключением к централизованным электросетям.

ГТУ можно объединять в энергоблоки различной мощности, что позволяет адаптировать систему энергоснабжения к конкретным потребностям космодрома или центра управления полётами.

Таким образом, помимо подтверждения прецизионного прогнозирования параметров ГТУ, обеспечиваемого программным комплексом «A2GTP» (ПК A2GTP), целью настоящей работы является демонстрация его потенциала как инструмента для оптимизации функционирования ГТУ и увеличения эффективности энергоснабжения в космической индустрии.

Материалы и методы исследования

ПК A2GTP, разработанный С.Ю. Оленниковым, предназначен для вариантного расчёта ряда параметров ГТУ по методике Л.В. Арсеньева и В.А. Рассохина [4]. Комплекс позволяет проводить расчёты установки с множеством вариативных исходных данных (различные степени повышения давления (ПИК), температура воздуха на входе, номинальная мощность и др.).

В основе ПК лежит реализация языка Fortran 77 для ЭВМ СОУ-6, которая функционирует на базе операционной системы РВС-6. Данная система доступна в учебных целях в вычислительном центре лаборатории турбиностроения им. И.И. Кириллова Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого и является

собственной разработкой. Авторскими правами в настоящее время владеет университет.

В таблице 1 перечислены программы, входящие в состав ПК. Кроме того, используются служебные программы, позволяющие задавать режимы внешних устройств ЭВМ, и программы вычисления стандартных функций, включённые в операционную систему [4].

Таблица 1 – Программы, входящие в ПК A2GTP, используемые для расчёта параметров ГТУ

Программы	Назначение
A2PAR	Расчёт параметров ГТУ, вывод результатов расчёта
PJKM	Функция для линейной интерполяции или экстраполяции
CMIA, CMIB, CMSA, CIAC, CIBC, CSAC, CSBC, CIGC, CSGC, CPMIA, CPMIB, CPMSA, CPMSB, CPIAC, CPIBC, CPSAC, CPSBC, CPIGC, CPSGC, COO	Вычисление средних и среднелогарифмических значений теплоёмкости воздуха, продуктов сгорания и газа с возможностью использования данных по стандартному углеводородному топливу или вводимых пользователем

Информация, вносимая в ПК, разделяется на два направления: входная и выходная. Объём первой составляет от 24 до 193 чисел в зависимости от количества значений степени повышения давления и желания применять обобщённые сведения о КПД компрессоров и теплоёмкости рабочего тела, имеющиеся в программе. Значения вводятся с клавиатуры в диалоговом окне. Объём выходной информации – до 103 строк шириной 80 знаков. В них входят заголовки, массивы чисел и пояснения. Данные выводятся на экран, а также на печатающее устройство.

ПК A2GTP позволяет рассчитать параметры рабочего процесса в характерных сечениях проточной части и основных характеристик ГТУ определённых типов: одновальных простого типа, с регенерацией, двухвальных, со свободной турбиной, с охлаждаемой турбиной [4].

Допустимый диапазон изменения параметров цикла в ПК [5, 6]:

- температура газа перед турбиной до 2000 °C;
- степень повышения давления до 50.

Для теплоёмкости воздуха, продуктов сгорания и газа предусмотрены следующие варианты расчётов:

- среднее и среднелогарифмическое значение в зависимости от температуры, рассчитанное по данным для воздуха и стандартного углеводородного топлива (встроенные данные) или введённое пользователем;
- среднее значение в зависимости от температуры, рассчитанное на основе данных для воздуха и стандартного углеводородного топлива (встроенные данные) или введённое пользователем;
- постоянное значение, не зависящее от температуры, используемое для всех вариантов расчёта в рамках одного запуска программы.

КПД компрессора может быть задан пользователем в виде функции или определён с помощью данных, имеющихся в ПК для одно-, двух- или трёхкаскадных компрессоров.

За один запуск комплекса можно задать от 1 до 20 значений степени повышения давления.

Программа обеспечивает частичный контроль ввода данных. Если числовое значение параметра выходит за пределы допустимого диапазона, пользователь получает сообщение об ошибке и предложение повторить ввод.

В случае обнаружения в процессе расчёта комбинации входных данных, приводящих к физически недостоверному результату (например, температура охладителя превышает допустимую температуру материала лопаток), ПК выдаёт пользователю сообщение об этом с рекомендациями по корректировке входных данных.

Массив входных данных вводится с клавиатуры в диалоговое окно в определённом порядке (таблица 2).

В рамках исследования рассматривалась установка ГТУ-170, отдельные параметры которой приведены в таблице 3, а структурные схемы с указанием контролируемых параметров показаны на рисунках 1 и 2. Одним из важных допущений является снижение эффективной мощности ГТУ со 170 до 160 МВт по причине высоких потерь и устаревания оборудования.

ГТУ-170 для испытаний горелочного устройства расположена в одном из отсеков (рисунок 1) стенда камер сгорания в крупной Санкт-Петербургской энергетической компании. Помещение стенда оборудовано общими системами газо-, электро-, воздухо- и водоснабжения, канализации, приточно-вытяжной вентиляции, пожаротушения и выхлопа продуктов сгорания. Газ к горелке подводится от газопровода высокого давления, оснащённого необходимой запорной и регулирующей арматурой.

Таблица 2 – Массив входных данных в ПК A2GTP [4]

Обозначение	Описание
–	Фамилия пользователя программы, инициалы, номер (или название) группы, дата выполнения расчёта – набирается в одной строке (Н-константа)
N_e	Эффективная мощность ГТУ, кВт
ТЗ*	Температура газа перед турбиной, К
$T_н$	Температура воздуха на входе в ГТУ, К
$P_н$	Давление воздуха на входе в ГТУ, МПа
μ	Степень регенерации теплообменника (если отсутствует, принимают за 0)
$T_{ст}$	Средняя допустимая температура материала стенки лопатки, К
$\Delta T^*_{во}$	Предварительное понижение температуры воздуха, поступающего на охлаждение турбины, К
$h_{о\ ср}$	Средняя величина перепада энтальпий на одну ступень турбины, кДж/кг
$\eta_{кс}$	Коэффициент полноты сгорания топлива
$\eta_{км}$	Коэффициент механических потерь в компрессоре
$\eta_{тм}$	Коэффициент механических потерь в турбине
$K_{исп}$	Коэффициент использования хладоресурса охладителя
$\sigma_{ут}$	Коэффициент утечек охладителя
$\sigma^*_{вх}$	Коэффициент потерь полного давления во входном устройстве
$\sigma^*_{в\ тепл}$	Коэффициент потерь полного давления воздуха в теплообменнике и трубопроводах
$\sigma^*_{кс}$	Коэффициент потерь полного давления в камере сгорания
$\sigma^*_{вых}$	Коэффициент потерь полного давления в выходном устройстве
$\sigma^*_{г\ тепл}$	Коэффициент потерь полного давления газа в теплообменнике
$\pi_к$	Степень повышения давления в компрессоре
$КПД_к$	КПД компрессора
$КПД_т$	КПД турбины
c_p	Удельная изобарическая теплоёмкость рабочего тела, кДж/кг

Таблица 3 – Технические характеристики ГТУ-170

Параметр	Обозначение	Значение
Эффективная мощность ГТУ, кВт	N_e	160 000
Температура газа перед турбиной, К	ТЗ*	1373
Температура воздуха на входе в ГТУ, К	$T_н$	288
Давление воздуха на входе в ГТУ, МПа	$P_н$	0,09975
Топливо – природный газ		
Прототип установки – Siemens V94.2		

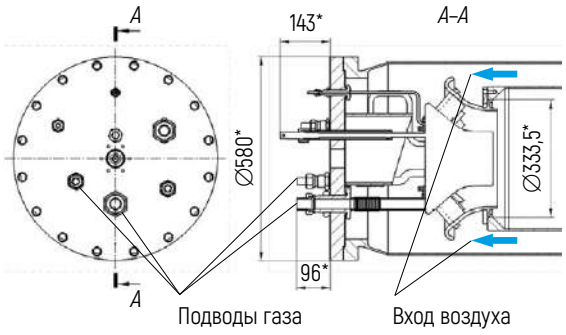


Рисунок 1 – Схема внутреннего устройства отсека ГТУ-170

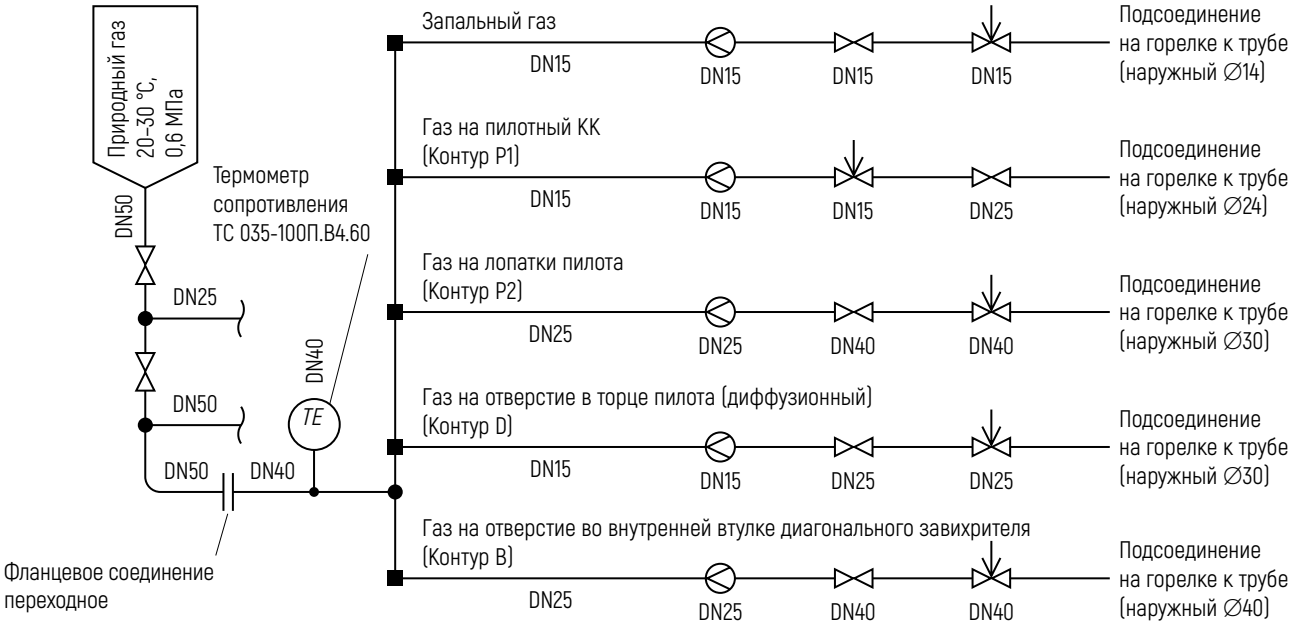


Рисунок 2 – Принципиальная схема подвода газа ГТУ-170

На рисунке 3 показан общий вид собранного для проведения испытаний отсека.

Рисунок 3 – Общий вид отсека для испытаний

Фактические данные для сравнения с теоретическими получены в ходе исследования, проведённого в 2023 г. Выходные значения для установки ГТУ-170 снимались с мониторов автоматизированного рабочего места автоматизированной измерительной системы (АИС) (рисунки 4 и 5).

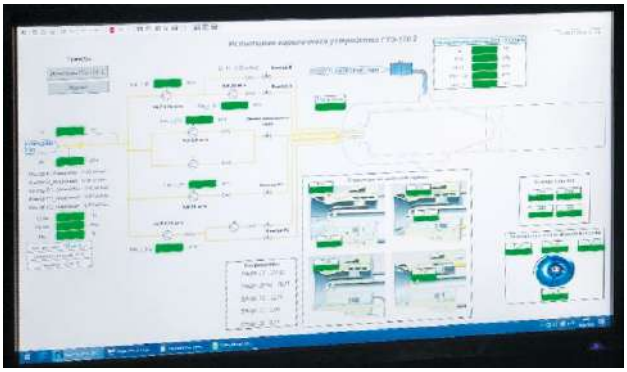


Рисунок 4 – Верхний монитор автоматизированного рабочего места АИС

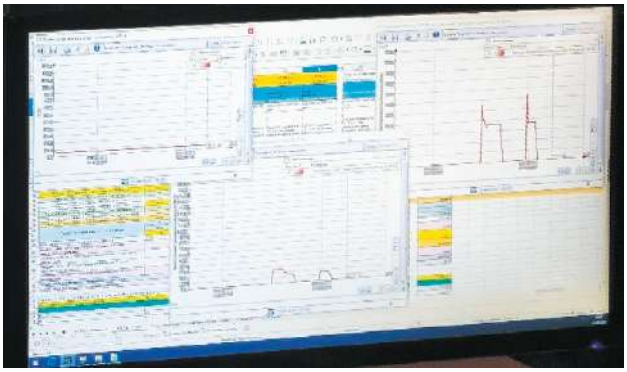


Рисунок 5 – Нижний монитор автоматизированного рабочего места АИС

Результаты испытаний сводились в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты испытаний на модельных режимах под нагрузкой 50 %

Обозначение рабочей точки	Время			
	12:00:00	12:10:00	12:15:00	12:23:00
Давление воздуха на входе в камеру сгорания (абс.), Па	101 300	101 300	101 300	101 300
Температура воздуха на входе в камеру сгорания, °С	15	15	15	15
Расход топлива в пилот (суммарный), кг/(кВт·ч)	0,419	0,432	0,444	0,463
Температура продуктов сгорания на выходе из отсека (Т1), °С	1041,3	1045,8	1051,7	1051,4
Температура продуктов сгорания на выходе из отсека (Т2), °С	1254,1	1261,5	1234,5	1228,4
Температура продуктов сгорания на выходе из отсека (Т3), °С	1000,8	1009,7	1009,3	1002,6
Температура продуктов сгорания на выходе из отсека (Т4), °С	780,8	773,7	776,3	771,4
Средняя арифметическая температура на выходе из отсека, °С	1019	1023	1018	1013
Расчётная температура продуктов сгорания за горелкой с учётом заданной полноты сгорания, °С	1048	1046	1047	1053
КПД установки	0,294	0,293	0,291	0,291

Все показания ротаметров, датчиков давления и термопар собирались и обрабатывались АИС, которая в режиме реального времени представляла вводные значения температуры и расхода воздуха и газа, контролировала изменения температуры уходящих газов, металла горелочного устройства и имитации пламенной трубы. Вся информация сохранялась для последующего анализа. Оба монитора автоматизированного рабочего места АИС являются частями одной используемой программы. На верхнем мониторе (рисунок 4) продемонстрирована мнемосхема процесса, выполненная в MasterSCADA [5]. На нижнем мониторе (рисунок 5) приведены графики расхода газа.

Экспериментальная часть

В рамках исследования произведён теоретический расчёт в ПК A2GTP. Его результаты сформированы в сводный файл с расширением «.res». Пример вывода данных для входной температуры Т3*, равной 1050 К, представлен на рисунках 6–9.

```
Программа A2GTP - вариантный расчет параметров рабочего процесса
                  ГТУ с охлаждаемой турбиной
Saveliev M.O. gr 40701 YVELICH T3, КПН 0,5
Введены входные данные:
1    NB= 160000.0кВт  T3*=1050.0K     TH=288.0K      PH=   .1013МПа
2    MW=        .000   TCT=1200.0K    ДТВ=100.0K    HOCP=250.0кДж/кг
3 КПДКС=       .990 КПДКМ=    .995 КПДТМ=   .995   КИСП=   .50  УТОХЛ=1.20
4 СИГВХ=       .990 СИГВТ=    .980 СИГКС=   .990 СИГВЫХ=   .995 СИГГТ= .999
5  Значения ПИК:
    2.0    3.0    4.0    5.0    6.0    7.0    8.0    9.0   10.0   11.0
   12.0   13.0   14.0   15.0   16.0   17.0   18.0   19.0   20.0   21.0
6 К.п.д. компрессора - использ. данные по осевым компр., имеющиеся в программе
  Компрессор однокаскадный
  Значения КПДКВ (соответствуют значениям ПИК):
   .898   .894   .890   .886   .882   .878   .874   .870   .866   .862
   .858   .854   .850   .846   .842   .838   .834   .830   .826   .822
7 Задан политропный к.п.д. турбины КПДТП= .880
8 Теплоемкость и другие параметры продуктов сгорания приняты как для
  стандартного углеводородного топлива
  Для расчета показателей степени в уравнениях процессов будут использованы
    средние значения теплоемкости
```

Рисунок 6 – Форма вывода данных ПК A2GTP в виде отчёта (часть 1)

Результаты расчета

ПИК	T2*	TOXЛ*	T5*	TG	TQ	T4A*	T4Q*	T6*	ПИТ
-	K	K	K	K	K	K	K	K	-
2.00	358.2	258.2	358.2	1050.0	1050.0	913.4	913.4	913.4	1.9
3.00	406.3	306.3	406.3	1050.0	1050.0	835.2	835.2	835.2	2.9
4.00	444.2	344.2	444.2	1050.0	1050.0	782.9	782.9	782.9	3.8
5.00	476.0	376.0	476.0	1050.0	1050.0	744.2	744.2	744.2	4.8
6.00	503.7	403.7	503.7	1050.0	1050.0	713.8	713.8	713.8	5.7
7.00	528.4	428.4	528.4	1050.0	1050.0	688.8	688.8	688.8	6.7
8.00	550.8	450.8	550.8	1050.0	1050.0	667.7	667.7	667.7	7.6
9.00	571.5	471.5	571.5	1050.0	1050.0	649.6	649.6	649.6	8.6
10.00	590.7	490.7	590.7	1050.0	1050.0	633.7	633.7	633.7	9.5
11.00	608.7	508.7	608.7	1050.0	1050.0	619.6	619.6	619.6	10.5
12.00	625.7	525.7	625.7	1050.0	1050.0	606.9	606.9	606.9	11.5
13.00	641.9	541.9	641.9	1050.0	1050.0	595.4	595.4	595.4	12.4
14.00	657.3	557.3	657.3	1050.0	1050.0	585.0	585.0	585.0	13.4
15.00	672.1	572.1	672.1	1050.0	1050.0	575.4	575.4	575.4	14.3
16.00	686.3	586.3	686.3	1050.0	1050.0	566.5	566.5	566.5	15.3
17.00	700.1	600.1	700.1	1050.0	1050.0	558.3	558.3	558.3	16.2
18.00	713.5	613.5	713.5	1050.0	1050.0	550.6	550.6	550.6	17.2
19.00	726.4	626.4	726.4	1050.0	1050.0	543.4	543.4	543.4	18.1
20.00	739.0	639.0	739.0	1050.0	1050.0	536.7	536.7	536.7	19.1
21.00	751.3	651.3	751.3	1050.0	1050.0	530.3	530.3	530.3	20.0

Рисунок 7 – Форма вывода данных ПК A2GTP в виде отчёта (часть 2)

ПИК	НК	СРМІВ	НТОХЛ	СРМІГ	АЛЬФА	АЛЬФА*	Z	QОХЛ	ПИОХЛ	НОХЛ1	КАППА
-	кДж/кг	кДж/(кг*К)	кДж/кг	кДж/(кг*К)	-	-	шт	кДж/кг	-	кДж/кг	-
2.0	70.5	1.0055	160.6	1.1756	3.73	.050	0	.0	1.9	.0	.000
3.0	119.3	1.0077	250.1	1.1642	3.99	.033	0	.0	2.9	.0	.000
4.0	157.8	1.0099	308.8	1.1562	4.23	.025	0	.0	3.8	.0	.000
5.0	190.3	1.0120	351.6	1.1499	4.45	.020	0	.0	4.8	.0	.000
6.0	218.7	1.0140	384.9	1.1448	4.66	.017	0	.0	5.7	.0	.000
7.0	244.2	1.0159	412.0	1.1405	4.87	.014	0	.0	6.7	.0	.000
8.0	267.5	1.0177	434.6	1.1368	5.07	.012	0	.0	7.6	.0	.000
9.0	289.0	1.0194	453.9	1.1335	5.28	.011	0	.0	8.6	.0	.000
10.0	309.1	1.0211	470.7	1.1307	5.49	.010	0	.0	9.5	.0	.000
11.0	328.0	1.0228	485.6	1.1281	5.70	.009	0	.0	10.5	.0	.000
12.0	345.9	1.0243	498.8	1.1256	5.92	.008	0	.0	11.5	.0	.000
13.0	363.1	1.0260	510.7	1.1234	6.15	.008	0	.0	12.4	.0	.000
14.0	379.5	1.0275	521.5	1.1214	6.38	.007	0	.0	13.4	.0	.000
15.0	395.3	1.0290	531.3	1.1195	6.62	.007	0	.0	14.3	.0	.000
16.0	410.5	1.0304	540.4	1.1177	6.87	.006	0	.0	15.3	.0	.000
17.0	425.2	1.0318	548.8	1.1160	7.13	.006	0	.0	16.2	.0	.000
18.0	439.6	1.0331	556.5	1.1144	7.40	.006	0	.0	17.2	.0	.000
19.0	453.5	1.0345	563.8	1.1129	7.69	.005	0	.0	18.1	.0	.000
20.0	467.1	1.0358	570.5	1.1115	7.99	.005	0	.0	19.1	.0	.000
21.0	480.5	1.0371	576.8	1.1101	8.30	.005	0	.0	20.0	.0	.000

Рисунок 8 – Форма вывода данных ПК A2GTP
в виде отчёта (часть 3)

ПИК	КПДКВ	КПДТВ	ОХЛ	Q1	GB	GГ	HE	КПДВ	КПДЕ	ВУТ	ФИ
-	-	-	%	кДж/кг	кг/с	кг/с	кДж/кг	-	-	кг/(кВт*ч)	-
2.0	.898	.888	.0	783.41	743.73	11774.879	91.8	.119	.116	1.049	.561
3.0	.894	.893	.0	732.21	201.62	71221.688	133.2	.184	.180	.675	.524
4.0	.890	.897	.0	691.61	042.44	21058.881	153.5	.225	.220	.553	.489
5.0	.886	.900	.0	657.4	976.485	991.123	163.9	.253	.247	.493	.459
6.0	.882	.902	.0	627.5	948.487	962.058	168.7	.274	.266	.457	.432
7.0	.878	.904	.0	600.7	940.547	953.430	170.1	.289	.280	.434	.407
8.0	.874	.905	.0	576.2	945.073	957.491	169.3	.300	.291	.418	.385
9.0	.870	.907	.0	553.6	958.528	970.627	166.9	.308	.299	.407	.363
10.0	.866	.908	.0	532.5	978.936	990.821	163.4	.314	.304	.400	.343
11.0	.862	.909	.0	512.51	005.48	71017.237	159.1	.318	.307	.396	.324
12.0	.858	.910	.0	493.71	037.79	01049.472	154.2	.321	.309	.393	.306
13.0	.854	.911	.0	475.61	075.70	01087.366	148.7	.322	.310	.393	.288
14.0	.850	.912	.0	458.41	119.54	61131.248	142.9	.322	.309	.394	.271
15.0	.846	.913	.0	441.81	170.10	51181.892	136.7	.320	.306	.397	.255
16.0	.842	.914	.0	425.81	227.14	51239.058	130.4	.317	.303	.401	.239
17.0	.838	.914	.0	410.21	292.68	21304.773	123.8	.314	.299	.407	.223
18.0	.834	.915	.0	395.11	367.83	91380.163	117.0	.309	.293	.415	.208
19.0	.830	.916	.0	380.51	454.30	61466.922	110.0	.303	.286	.425	.193
20.0	.826	.916	.0	366.11	554.28	81567.263	102.9	.295	.278	.437	.179
21.0	.822	.917	.0	352.11	671.08	41684.501	95.7	.287	.269	.452	.165

Нормальное завершение расчета

Рисунок 9 – Форма вывода данных ПК A2GTP
в виде отчёта (часть 4)

В качестве входных параметров вводились следующие данные: потери (по входному тракту, на утечку и др.), КПД ступеней, давление на входе, а также потери в камере сгорания, как указано в [4], с целью достоверного изучения и получения корректных показателей в работе.

В зависимости от температуры газов на входе составлены таблицы для полученных результатов. Пример вычисления для Т3* = 1050 К приведён в таблице 5.

Для отслеживания более подробной динамики изменения основных параметров в рамках достоверности построены графики (рисунки 10–12) и указаны зависимости от конкретной температуры.

Таблица 5 – Результаты вычислений для Т3* = 1050 К

ПИК ($\pi_к$)	КПДВ ($\eta_в$)	КПДЕ ($\eta_е$)	ВУТ ($b_{ут}$)
2	0,11	0,11	1,049
3	0,18	0,18	0,67
4	0,22	0,22	0,55
5	0,25	0,24	0,49
6	0,27	0,26	0,45
7	0,28	0,28	0,43
8	0,3	0,29	0,42
9	0,31	0,3	0,407
10	0,314	0,305	0,4
11	0,318	0,307	0,396
12	0,321	0,31	0,393
13	0,322	0,311	0,393
14	0,322	0,309	0,394
15	0,32	0,306	0,397
16	0,317	0,303	0,401
17	0,314	0,299	0,407
18	0,309	0,293	0,415
19	0,303	0,286	0,425
20	0,295	0,278	0,437
21	0,287	0,269	0,452

Примечание. ПИК ($\pi_к$) – степень повышения давления; КПДВ ($\eta_в$) – КПД внутренний; КПДЕ ($\eta_е$) – КПД эффективный; ВУТ ($b_{ут}$) – расход условного топлива.

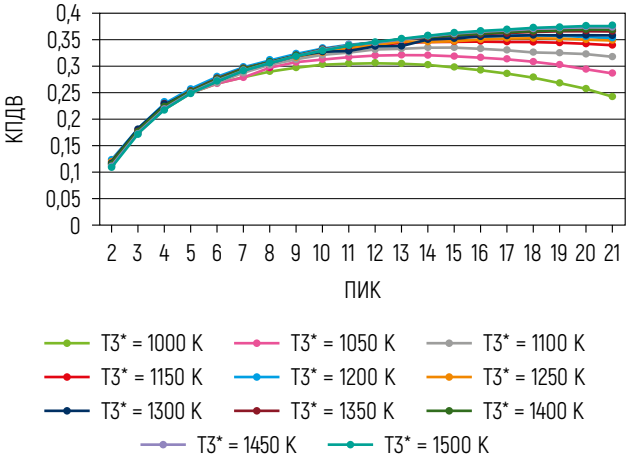


Рисунок 10 – Динамика изменения КПДВ от ПИК
в зависимости от температуры газа перед турбиной

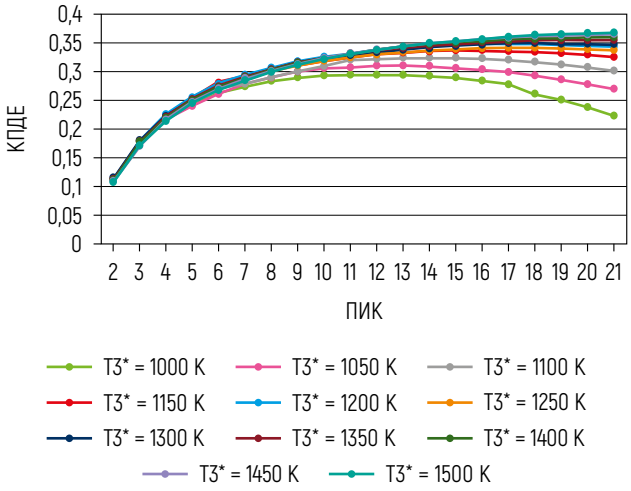


Рисунок 11 – Динамика изменения КПДЕ от ПИК
в зависимости от температуры газа перед турбиной

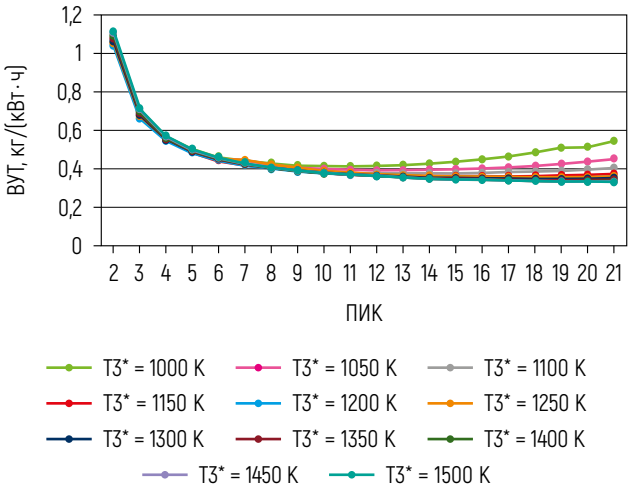


Рисунок 12 – Динамика изменения ВУТ от ПИК
в зависимости от температуры газа перед турбиной

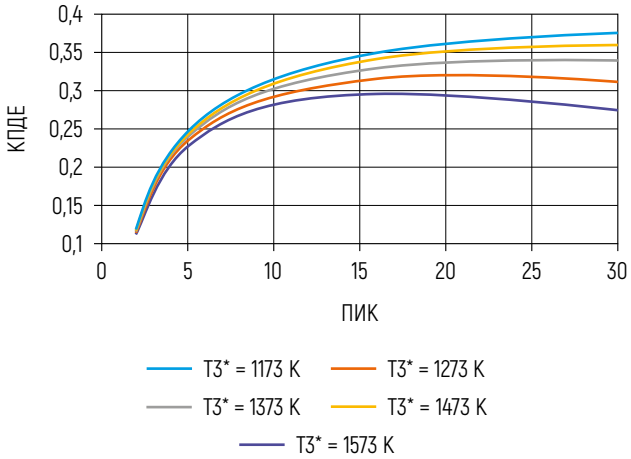


Рисунок 13 – График, составленный на основании данных,
полученных при испытаниях
фактически действующей установки ГТУ-170

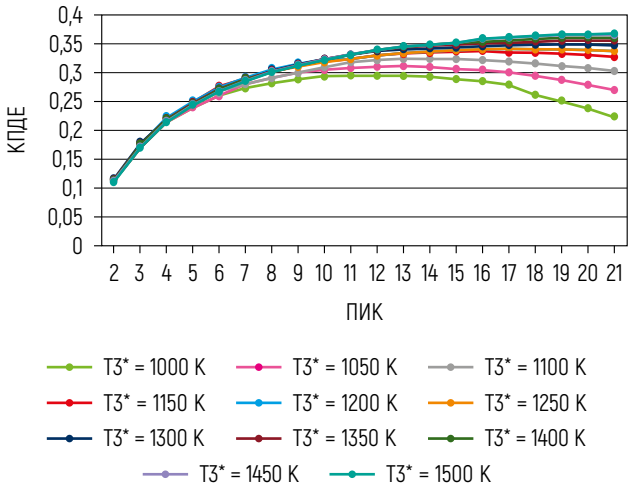


Рисунок 14 – График, полученный в ходе вычислений
с помощью ПК A2GTP

Результаты исследования

Сопоставив полученные вычисления с фактической информацией, можно сделать независимый вывод. В основе сравнения будут лежать ключевые показатели ГТУ [6, 7]. Рассмотрим результаты исследования на примере изменения КПДЕ в зависимости от степени повышения давления (рисунки 13 и 14).

Заметим, что график, составленный по данным вычислений в ПК A2GTP, имеет схожую динамику с фактически полученным графиком и представляет собой монотонное возрастание.

Для оценки расчётных значений найдём относительное отклонение σ [8, 9].

$$\sigma_{\eta_e} = \frac{\eta_{e\,(\text{факт. действ. уст.})} - \eta_{e\,(\text{теор. A2GTP})}}{\eta_{e\,(\text{факт. действ. уст.})}} \times 100\ \%,$$

$$\sigma_b = \frac{b_{(\text{факт. действ. уст.})} - b_{(\text{теор. A2GTP})}}{b_{(\text{факт. действ. уст.})}} \times 100\ \%,$$

где $\eta_{e(\text{факт. действ. уст.})}$ – значение КПД, снятое с фактически действующей установки;

$\eta_{e(\text{теор. A2GTP})}$ – значение КПД, вычисленное ПК A2GTP;

$b_{(факт. действ. уст.)}$ – значение удельного расхода топлива, снятое с фактически действующей установки, кг/(кВт·ч);

$b_{(теор. A2GTP)}$ – значение удельного расхода топлива, вычисленное ПК A2GTP, кг/(кВт·ч).

При ПИК = 20 и Т3* = 1050 К найдём относительные отклонения по КПД установки и удельному расходу топлива:

$$\sigma_{\eta_e} = \frac{|0{,}291 - 0{,}295|}{0{,}291} \times 100\ \% = 1{,}98\ \%,$$

$$\sigma_b = \frac{|0{,}443 - 0{,}437|}{0{,}443} \times 100\ \% = 1{,}36\ \%.$$

На основании анализа полученных данных и сравнения их с фактическими сделан вывод: среднее квадратичное отклонение по основным параметрам ГТУ составляет менее 2 % [10], что связано с грубым расчётом, округлёнными значениями и другими методическими ошибками.

Заключение

В результате исследования эффективности использования ПК A2GTP сформулировано несколько основных выводов:

- ПК A2GTP обеспечивает достоверные теоретические данные с отклонением от фактических не более чем на 2 %, что даёт возможность судить о корректности работы комплекса, а также о правильности применяемой методики;
- полученные зависимости точно отражают динамику изменения ключевых показателей функционирования ГТУ;
- задействование ПК A2GTP для первичного расчёта целесообразно ввиду вышеперечисленных причин;
- внедрение ПК A2GTP позволит в кратчайшие сроки дать оценку входным результатам.

Таким образом, благодаря применению ПК A2GTP при проектировании ГТУ можно значительно повысить точность прогнозирования рабочих характеристик данных установок, оптимизировать режимы эксплуатации и, как следствие, увеличить эффективность систем энергоснабжения космодромов.

Список основных источников

1. *Анализ вариантов конструкции эстакады ОТС и её оптимизация: отчёт об изыскател.-конструктор. работе / Центр НТТМ «Звёздный мир»; под общ. рук. А.Э. Юницкого; исполн.: О.П. Кривко, Г.Ф. Логвинов. – Гомель, 1989. – 117 с.*
2. *Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск: Парадокс, 2019. – 240 с.*
3. *uSpace: геокосмическая программа безракетного освоения ближнего космоса для спасения жизни на Земле // Astroengineering Technologies. – URL: https://uspaceprogram.com/?lang=ru (дата обращения: 15.05.2025).*
4. *Расчёт тепловой схемы ГТУ: учеб. пособие / Л.В. Арсеньев, В.А. Рассохин, С.Ю. Оленников, Г.Л. Раков; М-во науки, высш. шк. и техн. политики Рос. Федерации, С.-Петерб. гос. техн. ун-т. – СПб.: СПбГТУ, 1992. – 64 с.*
5. *Евменов, В.П. Интеллектуальные технологии и представления знаний. Гипотезы об интеллектуальных системах управления: учеб. пособие / В.П. Евменов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 301 с.*
6. *Костюк, Р.И. Тепловые и атомные электрические станции. Проектные решения и режимные характеристики ТЭЦ с парогазовыми установками утилизационного типа (на примере Северо-Западной ТЭЦ): учеб. пособие: в 3 ч. / Р.И. Костюк, А.Н. Блинов, В.М. Корень; под ред. Р.И. Костюка; С.-Петерб. гос. политехн. ун-т. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – Ч. 2: Конструктивные особенности и технические характеристики газотурбинной установки энергоблока ПГУ-450Т. – 270 с.*
7. *Иноземцев, А.А. Газотурбинные двигатели / А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий. – Пермь: ОАО «Авиадвигатель», 2006. – 1206 с.*
8. *Воропаева, Ю.А. Организация и управление в энергетике: учеб. пособие / Ю.А. Воропаева. – 3-е изд., стер. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 151 с.*
9. *Газотурбинные установки. Расчёт систем охлаждения лопаток газовых турбин. Программный комплекс COLD: учеб. пособие / С.М. Вохмянин, И.А. Богов, В.А. Суханов [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 119 с.*
10. *Савельев, М.О. Анализ результатов действующей установки ГТУ-170 на базе программного комплекса «A2GTP» / М.О. Савельев, Ю.В. Матвеев // Альтернативная энергетика. – 2025. – Вып. 17. – С. 82–85.*

УДК 681.625.9+629.7

Биопечать в космосе: технические вызовы и перспективы применения

Ф.А. Верёвка

ЗАО «Струнные технологии»,
г. Минск, Беларусь

Биопечать – одна из самых перспективных технологий XXI в., позволяющая производить живые ткани и органы с помощью трёхмерной печати. В условиях космических миссий, где медицинская помощь ограничена, данный метод может стать ключевым инструментом выживания и адаптации человека. При этом микрогравитация не только выступает в роли ограничения для биопечати, но и является благоприятной средой для создания тяжёлых биологических структур (в том числе человеческих тканей и органов), подверженных разрушению при воздействии земного притяжения. Учитывая положительный опыт применения биопечати на Земле и в космосе, можно с уверенностью говорить о перспективности этого направления в рамках будущих космических исследований.

Автором рассмотрены принципы биопечати, приведены сравнительные характеристики её основных видов: капельной, экструзионной, лазерной. Проанализированы вопросы использования технологии в космосе, а также связанные с этим технические вызовы. Описаны реальные проекты, относящиеся к биопечати, отражены возможности её применения как в процессе колонизации Луны и Марса, так и при реализации программы безракетной индустриализации космоса. Отмечены этические и правовые аспекты развития биопечати в космическом пространстве.

Ключевые слова:
безракетная индустриализация космоса, биопечать, колонизация Луны, колонизация Марса, космическое индустриальное ожерелье «Орбита» (КИО «Орбита»), микрогравитация, общепланетарное транспортное средство (ОТС), программа uSpace.

UDC 681.625.9+629.7

Bioprinting in Space: Technical Challenges and Application Prospects

F. Viarouka

Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

Bioprinting is one of the most promising technologies of the 21st century, allowing the creation of living tissues and organs using three-dimensional printing. In the context of space missions, where medical care is limited, this method could become a key tool for human survival and adaptation. At the same time, microgravity can not only act as limitation for bioprinting in space, but also simultaneously serve as a favorable environment for the creation of heavy biological structures (for example, human tissues and organs) that are susceptible to destruction under the influence of Earth's gravity. The positive experience of using bioprinting in the conditions of Earth and space provides full grounds to take seriously the prospects of using this technology in the framework of future space research.

The author examines the principles of bioprinting and gives comparative characteristics of its main methods – droplet, extrusion, and laser. The paper also addresses the use of the technology in space and the associated technical challenges. Real-world bioprinting projects are described, and potential applications are discussed both in the context of future colonization of the Moon and Mars and within the framework of the non-rocket near space industrialization program. Ethical and legal aspects of the development of bioprinting in outer space are also considered.

Keywords:
bioprinting,
colonization of Mars,
colonization of the Moon,
General Planetary Vehicle (GPV),
Industrial Space Necklace "Orbit" (ISN "Orbit"),
microgravity,
non-rocket near space industrialization,
uSpace program.

Введение

В эпоху стремительного освоения космоса человечество сталкивается с вызовами, требующими инновационных решений, одно из которых – биопечать. Эта технология позволяет создавать живые ткани и органы с помощью трёхмерной печати. Если на Земле данный метод уже используется в медицине, фармацевтике и регенеративной терапии, то его применение за пределами нашей планеты открывает совершенно иные горизонты [1–4].

В условиях длительных космических миссий (например, экспедиции на Луну или Марс) здоровье и выживание экипажа становятся критически важными. Ограниченность медицинских ресурсов, невозможность экстренной эвакуации и воздействие микрогравитации на организм требуют автономных и адаптивных решений. По оценкам NASA, эвакуация астронавта с поверхности Марса занимает от шести до девяти месяцев, что делает невыполнимым срочное лечение. Биопечать, как технология изготовления живых тканей и органов на месте, может рассматриваться в качестве инструмента в том числе для урегулирования этой проблемы. Данный метод способен стать ключевым элементом будущей космической медицины – от создания кожных покровов и хрящей до потенциальной печати целых органов (рисунок 1) [1]. Таким образом, освоение биопечати в космосе является значительным шагом к устойчивому присутствию человека за пределами Земли.

Цель настоящей статьи – рассмотреть текущее состояние и перспективы биопечати в космосе, проанализировать связанные с ней технические и этические вызовы, а также представить проекты, уже реализованные в рамках международных космических программ.

Биопечать и её основные виды

Биопечать, т. е. технология трёхмерной печати живых тканей, основана на принципах аддитивного производства. В отличие от обычной 3D-печати, где применяется пластик или металл, биопринтеры работают с биочернилами – веществами, содержащими живые клетки, гидрогели, питательные среды и другие биологические компоненты.

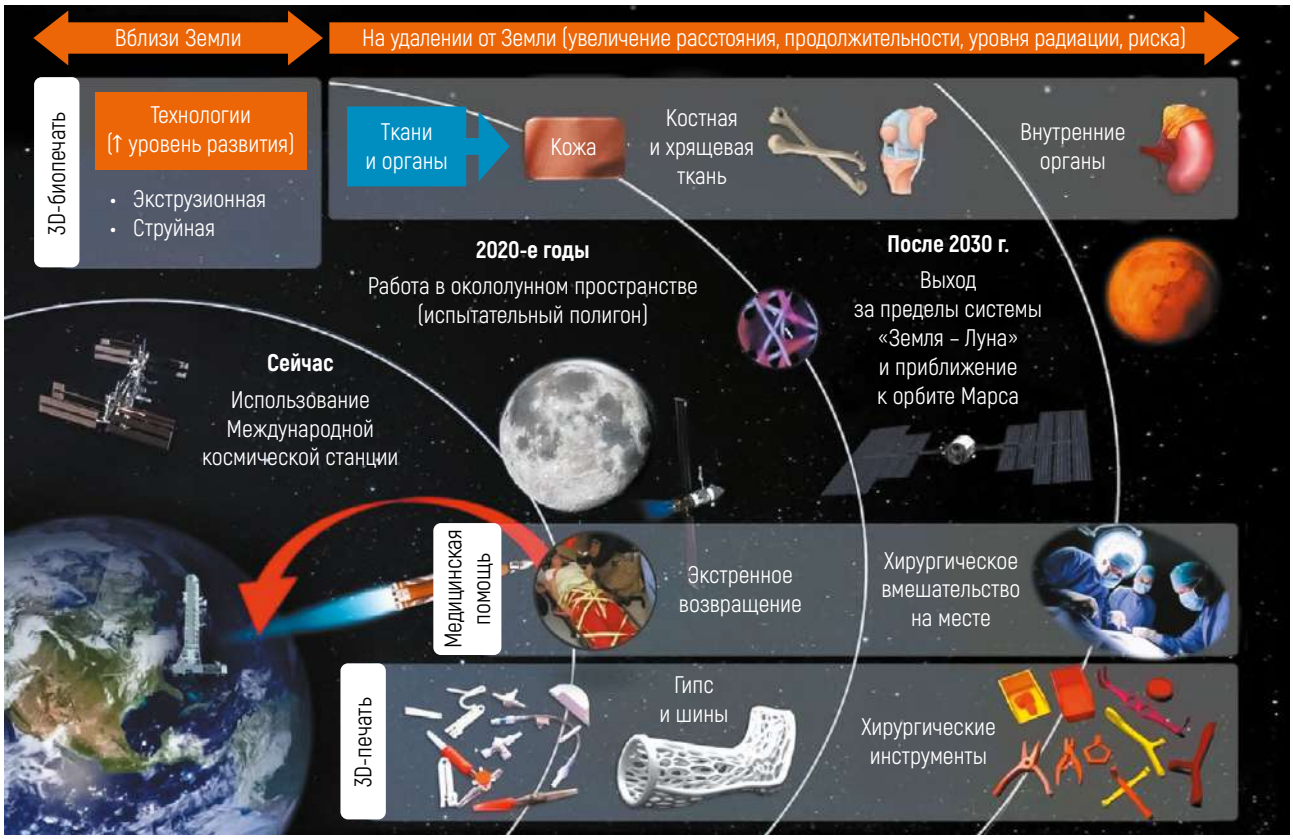


Рисунок 1 – Биопечать в космосе, перспективы применения

С помощью биопечати можно создавать кожные покровы для лечения ожогов и ран, хрящевые и костные ткани для ортопедии, кровеносные сосуды и даже прототипы органов – печени, почек, сердца.

Существуют три основные технологии биопечати: капельная (струйная), экструзионная, лазерная, каждой из которых соответствуют различные варианты дозаторов для гидрогелей с клеточным материалом (рисунок 2) [5–10].

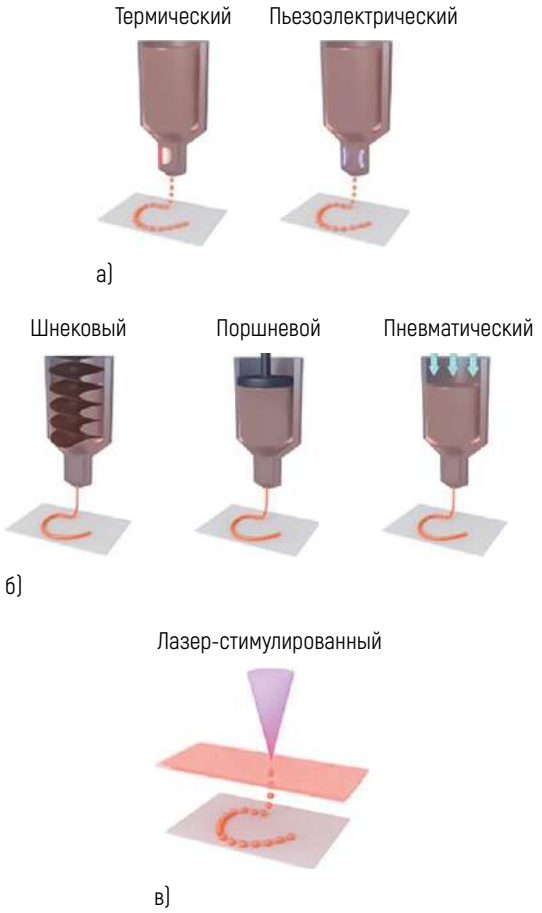


Рисунок 2 – Варианты дозаторов для гидрогелей с клеточным материалом в основных видах биопечати: а – капельной (струйной); б – экструзионной; в – лазерной [8]

Капельная (струйная) биопечать

Капельная биопечать – один из методов биопринтинга, при котором биологические материалы (например, клетки, гидрогели, питательные среды) подаются на подложку в виде мелких капель. Этот подход позволяет с высокой точностью создавать сложные трёхмерные биоструктуры. Капли формируются с помощью термических или пьезоэлектрических форсунок (рисунки 2, 3) и наносятся по заданной траектории, слой за слоем, образуя 3D-структуру.

Рисунок 3 – Принцип работы капельной (струйной) печати: а – термическая модель; б – пьезоэлектрическая модель [10]

Преимущества капельной (струйной) биопечати:

- высокая точность дозирования: можно контролировать количество клеток биологического материала в каждой капле;
- мягкие условия процесса: механическое воздействие на клетки минимально;
- многокомпонентность: можно комбинировать разные типы клеток и материалов;
- относительно высокая скорость, например по сравнению с экструзионной биопечатью.

Недостатки капельной биопечати:

- ограниченная вязкость биочернил: слишком густые материалы не подходят;
- частое слипание и осаждение клеток в картридже;
- ограниченная масштабируемость: сложно печатать крупные ткани.

Области применения капельной биопечати разнообразны: создание моделей тканей, печать органоидов (миниатюрные модели органов), исследование регенерации тканей и клеточного взаимодействия.

Экструзионная биопечать

Экструзионная биопечать – один из ключевых методов 3D-биопечати, при котором биоматериалы выдавливаются через тонкое сопло биопринтера для послойного создания трёхмерных биологических структур. Способы подачи биочернил: пневматический – давление воздуха выталкивает материал; механический – используется поршень или винтовой механизм (рисунок 4). В качестве материалов для биочернил чаще всего применяются гидрогели (например, альгинат, желатин, коллаген), которые поддерживают жизнеспособность клеток и обеспечивают нужную форму [9, 10].

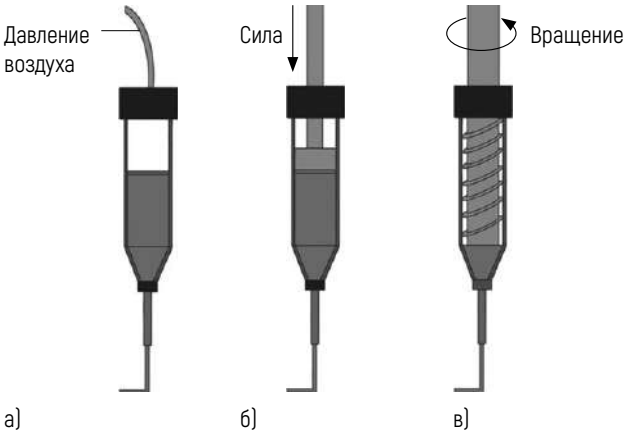


Рисунок 4 – Принцип работы экструзионной печати:
а – пневматический экструдер; б – поршневой экструдер;
в – винтовой (шнековый) экструдер [10]

Преимущества экструзионной биопечати:

• высокая выживаемость клеток, что позволяет получать сложные анатомические формы;

• жизнеспособность клеток: мягкие условия печати сохраняют клетки живыми;

• гибкость к выбору типа воспроизводимой ткани: подходит для разных типов – кожи, хрящей, сосудов и даже органов.

Недостатки экструзионной биопечати:

• скорость печати: ниже, чем у других методов, например по сравнению с капельной печатью;

• разрешение: меньше, чем у лазерных технологий;

• механическая прочность: напечатанные структуры часто требуют дополнительной стабилизации. Стоит отметить, что данный недостаток несколько нивелируется условиями микрогравитации, что будет отражено ниже.

Лазерная биопечать

Лазерная биопечать – высокоточная технология получения биологических тканей с использованием лазера для послойного нанесения биоматериалов, основанная на лазерно-индуцированной передаче материала (laser-induced forward transfer – LIFT) или на так называемой прямой лазерной записи (laser direct-write – LDW) [9, 10]. Принцип работы такой печати заключается в следующем: источник лазера направляет импульс на тонкую донорскую плёнку, покрытую биоматериалом (например, клетками, гидрогелем); импульс вызывает мгновенный нагрев и испарение материала в точке воздействия, образуя пузырь. Давление, создаваемое расширяющимся пузырьком, выталкивает микрокапли биочернил с донорной подложки на приёмную, которая может быть предварительно подготовленной или являться поверхностью другого биоматериала. Процесс повторяется многократно, слой за слоем, чтобы сформировать трёхмерную структуру необходимой ткани или органа. На рисунке 5 представлена схема работы лазерного 3D-биопринтера.

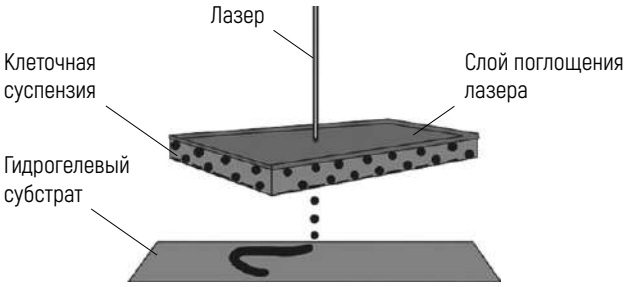


Рисунок 5 – Принцип работы лазерной биопечати [10]

Преимущества лазерной биопечати:

• высокая точность: позволяет размещать клетки с микронной точностью;

• бесконтактность: отмечается малый риск повреждения клеток, обусловленный их высокой выживаемостью (85–95 % [10]);

• совместимость с разными типами клеток, включая стволовые, эпителиальные и др.;

• возможность печати наиболее сложных структур: сосудов, кожи, хрящей и даже органоидов.

К недостаткам лазерной биопечати относятся особая техническая сложность оборудования и, как следствие, высокая относительная стоимость. Подчеркнём, что речь идёт именно об относительной стоимости, поскольку этот показатель обычно сложно оценить для проектов, в которых другие методы биопечати не способны обеспечить ряд критических параметров, например требуемую точность.

Сравнение методов биопечати с указанием основных принципов их работы приведено в таблице 1.

В таблице 2 перечислены ключевые области применения биопечати в земных условиях.

Таким образом, на Земле биопечать уже используется в медицине, фармацевтике, косметологии и является эффективным методом в научных исследованиях. Однако, основываясь на вышепредставленной информации, можно утверждать, что потенциал биопринтинга выходит далеко за пределы земной гравитации.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика методов биопечати [8, 11–21]

Характеристика	Капельная (струйная)	Экструзионная	Лазерная
Принцип работы	Выброс микрокапель биочернил через форсунки	Выдавливание биочернил через сопло	Перенос капель с помощью лазерного импульса
Преимущества	Точность дозирования. Относительно высокая скорость печати. Мягкое воздействие на клетки. Возможность одновременного использования различных биочернил	Подходит для вязких материалов. Масштабируемость. Простота в эксплуатации. Относительно низкая стоимость	Высочайшая точность. Отсутствует контакт биоматериала с соплом. Совместимость с разными типами клеток
Недостатки	Ограниченная вязкость биочернил. Необходимость применения дополнительных методов фиксации компонентов биочернил после печати. Относительно низкая выживаемость клеток (85 %)	Механическое воздействие на клетки. Низкая точность в сравнении с капельной и лазерной биопечатью	Техническая сложность оборудования. Высокая стоимость. Вероятность негативного влияния лазерного излучения на клетки (активно ведутся исследования по изучению этого фактора)
Область применения	Печать органоидов, различных типов тканей	Печать крупных тканей, кровеносных сосудов. Создание имплантов	Печать сосудов, тканей, органоидов

Таблица 2 – Ключевые области использования биопечати на Земле

Область применения	Примеры
Тканевая инженерия	Изготовление кожных покровов, хрящей, сосудов
Фармакология	Тестирование лекарств на биомоделях
Онкология	Моделирование опухолей для изучения терапии
Трансплантология	Исследования по созданию органов

Применение биопечати в космосе

Освоение космоса требует автономных решений в области медицины. В условиях длительных миссий – на Луне, Марсе или в ходе глубоких космических экспедиций – здоровье экипажа становится критически важным фактором выживания. Биопечать здесь может быть главным инструментом для обеспечения медицинской помощи.

Основные причины необходимости биопечати за пределами Земли:

- ограниченность медицинских ресурсов: биопринтер способен стать универсальным устройством для создания тканей, имплантов и даже органов непосредственно на месте – в космическом пространстве;
- невозможность эвакуации: в случае травмы или болезни астронавта, например на Марсе, возвращение на Землю займёт месяцы. Биопечать позволяет оперативно реагировать на медицинские ситуации;
- поддержка научных исследований: посредством печати моделей органов и тканей в космосе можно изучать влияние микрогравитации на клеточные процессы, моделировать заболевания и тестировать лекарства.

Таким образом, биопечать становится не просто технологией будущего, а необходимым элементом устойчивого присутствия человека в космосе.

Технические вызовы для биопечати в космосе

Несмотря на огромный потенциал биопечати в космосе, её реализация сталкивается с решением ряда сложных технических задач. Условия вне Земли – от микрогравитации до ограниченного пространства и ресурсов – требуют адаптации оборудования, материалов и технологических процессов в целом.

Следует отметить, что в данном разделе не указаны очевидные ограничения, связанные с применением аддитивной технологии, в том числе и в земных условиях: обеспечение точности печати и длительности жизнеспособности клеток, а также благоприятной интеграции, например, клеток напечатанной ткани с клетками существующих тканей.

На рисунке 6 представлены наиболее важные технические аспекты, которые нужно принимать во внимание для качественной реализации биопечати в космосе.

Описанные технические вызовы – не препятствия, а стимулы для инноваций. Уже сегодня учёные и инженеры разрабатывают решения, которые позволят биопечати стать частью космической инфраструктуры. Рассматривая положительные факторы некоторых технических вызовов, отдельно следует выделить вопросы, связанные с микрогравитацией, в частности отметить ряд преимуществ, обусловленных её наличием в космосе.

Микрогравитация – уникальная среда, которая радикально меняет поведение жидкостей, клеток и биологических материалов. В контексте биопечати (особенно 3D-биопечати тканей и органов) она открывает новые возможности.

Основные преимущества микрогравитации для биопечати в космосе:

- отсутствие оседания клеток и других материалов: они не опускаются под действием силы тяжести, что позволяет равномерно распределять их в биочернилах и производить более однородные объекты;
- построение сложных трёхмерных структур: на Земле гравитация может деформировать мягкие биоматериалы, в частности при печати крупных или сложных изделий. В космосе эти ограничения снимаются, что способствует созданию точных и стабильных конструкций;

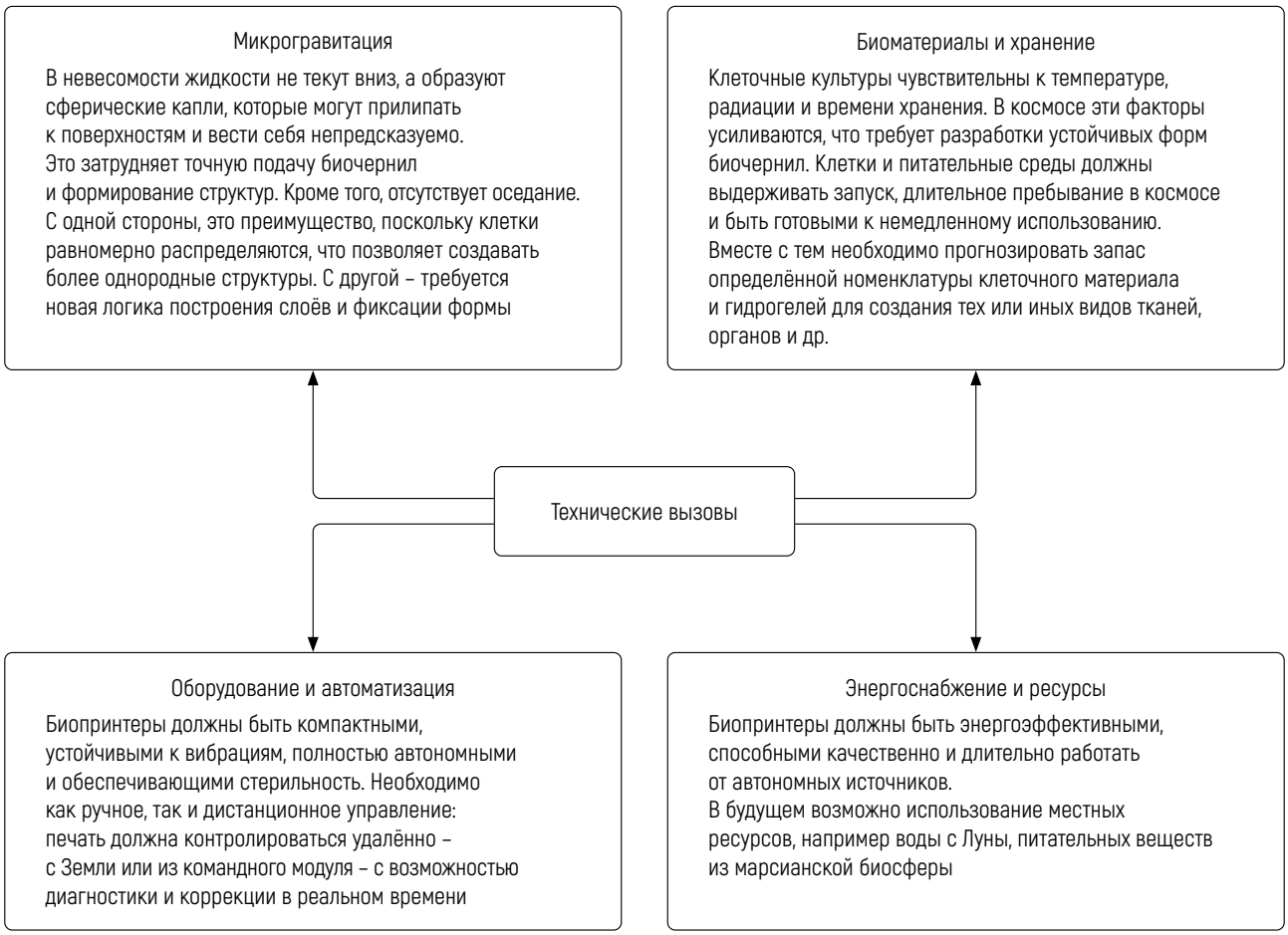


Рисунок 6 – Ключевые технические вызовы, которые необходимо решить для применения биопечати в космических условиях

• улучшенное взаимодействие клеток: они демонстрируют повышенную активность и быстрее формируют ткани, особенно это касается сосудистых и костных структур;

• моделирование заболеваний: технология биопечати позволяет создавать ткани и органы с уже имеющимися патологиями. На подобных манекенах можно испытывать передовые терапевтические стратегии. Так, некоторые патологии (например, остеопороз, саркопения) развиваются быстрее в условиях микрогравитации, что делает космос идеальной лабораторией для изучения и тестирования новых терапий.

Биочернила для биопечати

Биочернила – ключевой компонент биопечати, определяющий успех создания жизнеспособных тканей и органов. Представляют собой биосовместимые материалы, часто содержащие живые клетки, которые могут быть напечатаны с высокой точностью и сохранять свою структуру и функцию после печати. Основные требования к биочернилам приведены в таблице 3.

В таблице 4 дана классификация часто используемых в настоящее время биочернил.

Современные тренды развития материаловедения для биопечати включают следующие направления: интеллектуальные биочернила (материалы, реагирующие на внешние стимулы: pH, температуру, свет); биочернила с органоидными клетками (используются для создания миниатюрных моделей органов) и многофункциональные составы (содержат факторы роста, наночастицы, антибиотики).

Ключевые проекты и эксперименты, связанные с биопечатью в условиях микрогравитации (за последнее десятилетие)

Развитие биопечати в условиях микрогравитации стало предметом активных исследований в рамках международных космических программ. Далее представлены три ключевых проекта, демонстрирующих практическую реализацию технологии биопечати за пределами Земли.

Таблица 3 – Основные требования к биочернилам

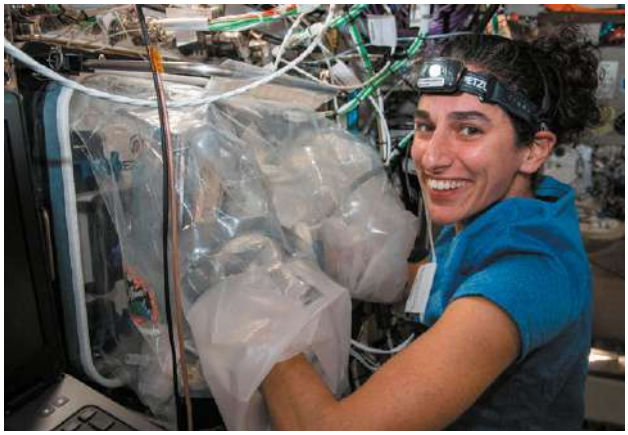
Требование	Свойства
Биосовместимость	Не вызывают иммунного ответа, безопасны для клеток
Оптимальная реология	Подходящая вязкость и текучесть для стабильной печати
Механическая стабильность	Способность сохранять форму после печати
Поддержка жизнеспособности клеток	Обеспечение питательной среды и условий для роста
Биодеградация	Возможность контролируемого распада материала (при необходимости)

Таблица 4 – Классификация биочернил

Тип биочернил	Описание	Примеры	Применение
Натуральные полимеры	Обеспечивают хорошую биосовместимость и клеточную адгезию	Коллаген, желатин, альгинат, фибрин	Кожа, хрящи
Синтетические полимеры	Обладают высокой стабильностью и контролируемыми свойствами	Полиэтиленгликоль, поликапролактон	Каркасы, сосуды
Декстрозные и сахарные гели	Используются для поддержки клеток и создания мягких структур	Каррагинан, агароза	–
Гидрогели с клетками	Содержат живые клетки и обеспечивают их распределение	Матригель, биогели на основе гликозаминогликанов	–
Гибридные материалы	Комбинируют свойства натуральных и синтетических компонентов	Желатин-метакрилат, полиэтиленгликольдиакрилат с коллагеном	Мягкие ткани, органоиды

3D BioFabrication Facility: первый биопринтер на орбите

3D BioFabrication Facility (BFF), разработанный компаниями Techshot и nScrypt при поддержке Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA), – первый полноценный биопринтер, установленный на борту Международной космической станции (МКС) [1, 22, 23]. Устройство предназначено для печати сложных клеточных структур, включая сердечные ткани, без применения каркасных опор, что достигается благодаря уникальным условиям микрогравитации. Так, в 2023 г. в рамках проекта BFF-Meniscus-2 достигнут значительный успех: на МКС удалось напечатать часть человеческого мениска коленного сустава (рисунок 7).



а)

б)

Рисунок 7 – Использование BFF на МКС:
а – астронавт NASA Ж. Могбели меняет компоненты внутри BFF;
б – фрагмент мениска коленного сустава,
напечатанный на МКС с применением BFF [22]

BFF представляет собой модульную платформу, способную работать в автоматическом режиме и гарантировать стерильность процесса. Эксперименты с использованием данного биопринтера подтвердили возможность создания трёхмерных биологических конструкций, пригодных для дальнейшего культивирования и медицинского применения.

В перспективе технология может быть интегрирована в автономные медицинские станции на Луне и Марсе, обеспечивая астронавтам доступ к персонализированной регенеративной медицине.

Проект компании 3D Bioprinting Solutions по биопечати хрящевой ткани

Российская компания 3D Bioprinting Solutions реализовала уникальный проект, в рамках которого на МКС проведён ряд опытов по биопечати живых тканей. В 2018 г. на орбиту доставлен биопринтер «Орган.Авт» (рисунок 8), предназначенный для работы в условиях микрогравитации [22, 24–26]. В ходе экспериментов успешно напечатаны образцы хрящевой ткани человека и щитовидной железы мыши.

Рисунок 8 – Магнитный биопринтер «Орган.Авт» [26]

Исследования показали, что микрогравитация способствует более стабильному формированию биологических конструкций, улучшает межклеточные взаимодействия и ускоряет процессы тканевой организации. Это подтверждает возможность создания функциональных биоструктур в космосе, что имеет важное значение для будущих миссий с длительным пребыванием человека за пределами Земли.

Эксперименты NASA и ESA на борту МКС

Одним из знаковых шагов к внедрению биопечати в космосе стал проект Bioprint FirstAid, разработанный по инициативе Европейского космического агентства (ESA) в сотрудничестве с немецкими исследователями [22, 23]. Устройство представляет собой портативный биопринтер (рисунок 9), предназначенный для экстренного заживления ран в условиях невесомости. Принцип его действия основан на нанесении биочернил, содержащих клетки пациента, непосредственно на повреждённую область для образования биологического пластыря.

Рисунок 9 – Астронавт ESA М. Маурер испытывает на Земле биопринтер для оказания первой помощи [23]

Эксперимент на борту МКС продемонстрировал: микрогравитация способствует равномерному распределению клеток и позволяет формировать тонкие тканевые слои без необходимости использования поддерживающих каркасов. Это открывает перспективы для применения технологии как в космосе, так и в земных условиях, особенно в ситуациях, когда традиционные методы лечения недоступны.

Будущее биопечати в космосе

Согласно данным описанных выше космических экспериментов, проводимых Роскосмосом, NASA, ESA и другими организациями, очевидно, что биопечать выходит за пределы земной гравитации и с течением времени имеет все шансы стать одним из ключевых элементов будущих длительных космических миссий. В условиях ограниченных ресурсов и удалённости от Земли технологии биопечати могут сыграть решающую роль в обеспечении здоровья астронавтов.

В продолжительных полётах, таких как экспедиции на Марс, риск травм и заболеваний возрастает. Биопечать послужит основой для автономных медицинских модулей, способных на месте производить лекарства, импланты и кожные покровы. Космические станции будут оснащены биореакторами и принтерами, работающими в условиях микрогравитации, что поможет достичь медицинской независимости экипажей и повысит шансы на успешное завершение миссий. Биопринтеры смогут изготавливать ткани и даже целые органы из клеток самих астронавтов, минимизируя риск отторжения. Это позволит проводить сложные медицинские процедуры без необходимости возвращения на Землю.

При рассмотрении биопечати как важной составляющей космической колонизации следует отметить, что в перспективе данная технология может использоваться для получения биологических материалов при строительстве инфраструктуры жизнеобеспечения на других планетах. Такой подход сделает устойчивым существование человека вне Земли и ускорит процесс колонизации, например, Луны и Марса.

Отдельного внимания заслуживает вопрос перспективности применения биопечати в рамках геокосмической программы uSpace, предложенной А.Э. Юницким [27, 28]. Ключевым элементом программы является идея создания общепланетарного транспортного средства (ОТС) – замкнутой кольцевой структуры, опоясывающей Землю и обеспечивающей индустриальные грузо- и пассажиропотоки в ближний космос и обратно. Размещение индустриальных сооружений, а также жилых космических поселений – ЭкоКосмоДомов (ЭКД), в которых будет жить и работать обслуживающий персонал, планируется на космическом индустриальном ожерелье «Орбита» (КИО «Орбита») – орбитальном транспортно-инфраструктурном и индустриально-жилом комплексе, охватывающем планету в плоскости экватора на заданной высоте и имеющем соответствующую длину (42 520 км для высоты 400 км) [29, 30].

Предполагается, что интеграция биопечати в КИО «Орбита» позволит:

- проводить регенеративные и трансплантационные исследования вне влияния земной гравитации;
- разрабатывать новые лекарства и изучать ход болезней, для которых условия микрогравитации являются стимулирующими;
- производить импланты, органы, биоматериалы, а также при необходимости искусственную пищу с возможностью их оперативной доставки на Землю;

• создавать орбитальные биофабрики, снабжающие продукцией марсианские и лунные экспедиции, которые не предусматривают возвращения на Землю.

На основании исследования существующих систем биопечати, применяемых на МКС, можно предположить, что для успешного функционирования и исполнения вышеперечисленных задач технический модуль биопечати на КИО «Орбита» должен включать в себя: принтеры и инкубаторы, систему жизнеобеспечения (питательные среды, средства и оборудование стерилизации), системы автоматики и контроля (камеры наблюдения, датчики и удалённый доступ), а также специальную радиационную защиту.

Этические и правовые аспекты биопечати в космосе

Использование биопечати за пределами Земли имеет не только технические, но и этические, а также правовые аспекты. Вот малая толика вопросов, с которыми придётся столкнуться мировому сообществу при расширении сфер применения биопечати в космическом пространстве: кто контролирует технологии за пределами Земли; насколько возможна и допустима ли утилизация биоматериалов в космосе (например, на Луне, Марсе или в открытом космосе в целом); что делать с органом, который «не получился» или начал под влиянием внеземной среды каким-то образом меняться (отторгаться, мутировать) уже после имплантации? Все эти проблемы весьма нетривиальны и требуют глубокого анализа и философского осмысления. Очевидным является тот факт, что даже относительно простые аспекты собственности и доступа к медицинским ресурсам нуждаются в международном регулировании, что должно привести к необходимости разработки космического биоэтического кодекса.

Более глубоким с философской точки зрения видится вопрос клонирования и трансплантации. Сама возможность создания органов в космическом пространстве вызывает этические дискуссии – от моральных границ до прав пациента. Например, кто будет решать, кому достанется единственная почка, если она нужна одновременно двоим астронавтам?

Заключение

Биопечать в космосе – не просто технологическая новинка, а стратегически важный элемент будущего освоения Солнечной системы, объединяющий медицину, биотехнологии, инженерное мышление, космическую науку, юриспруденцию и даже философию, открывая путь к автономному и устойчивому существованию человека за пределами Земли. В настоящее время уже имеются значимые достижения в применении биопечати авторитетными международными космическими организациями, такими как Роскосмос, NASA, ESA и др. Использование данной технологии при реализации программы uSpace [27] имеет достаточно яркие перспективы: от решения ряда исследовательских задач до непосредственного получения физического продукта в виде биоматериалов, имплантов и др.

Транспортно-логистические возможности ОТС как нельзя лучше подходят для доставки с планеты на орбиту оборудования и биоматериалов, требуемых для успешного проведения научно-исследовательских и практических работ, и для оперативной транспортировки с КИО «Орбита» [30] на Землю результатов применения биопечати.

Среди преимуществ размещения биопечатных модулей на КИО «Орбита» можно выделить: автономность (минимизация зависимости от земной логистики); наличие собственной энергии (питание от солнечных батарей); условия микрогравитации, которые, несмотря на множество технических вызовов, позволяют печатать сложные ткани без их деформации; эффективный материальный обмен между Землёй и КИО «Орбита».

Нельзя не отметить, что биопринтинг начал внедряться относительно недавно, поэтому имеет немало ограничений к использованию, причём не только технических, но также правовых и этических [31]. Однако в условиях современного экспоненциального симбиотического развития науки и техники можно предположить достаточно скорое решение большинства проблем, возникающих на текущем этапе становления биопечати. Подтверждением сказанному служит уверенный рост количества научных исследований по данной тематике, что подчёркивает актуальность этого междисциплинарного направления.

Список основных источников

1. *Sarabi, M.R. Bioprinting in Microgravity / M.R. Sarabi, A.K. Yetisen, S. Tasoglu // National Library of Medicine. – URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10265578/ (date of access: 04.08.2025).*
2. *3D Bioprinting in Microgravity: Opportunities, Challenges, and Possible Applications in Space / A. Van Ombergen, F. Chalupa-Gantner, P. Chansoria [et al.] // Advanced Healthcare Materials. – 2023. – Vol. 12, iss. 23. – 2300443.*

3. *Can 3D Bioprinting Be a Key for Exploratory Missions and Human Settlements on the Moon and Mars? / N. Cubo-Mateo, S. Podhajsky, D. Knickmann [et al.] // Biofabrication. – 2020. – Vol. 12, iss. 4. – 043001.*
4. *Seol, Y.J. Bioprinting Technology and Its Applications / Y.J. Seol, H.W. Kang, S.J. Lee // European Journal of Cardio-Thoracic Surgery. – 2014. – Vol. 46, iss. 3. – P. 342–348.*
5. *Волотовский, И.Д. Трёхмерная 3D-биопечать: основы технологии и её использование в интересах биологии и медицины / И.Д. Волотовский, С.В. Пинчук // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия биологических наук. – 2022. – Т. 67, № 1. – С. 114–126.*
6. *Bioprinting for the Biologist / A.C. Daly, M.E. Prendergast, A.J. Hughes, J.A. Burdick // Cell. – 2021. – Vol. 184, iss. 1. – P. 18–32.*
7. *3D Printing in Ophthalmology: From Medical Implants to Personalised Medicine / G. Tan, N. Ioannou, E. Mathew [et al.] // International Journal of Pharmaceutics. – 2022. – Vol. 625. – 122094.*
8. *Введение в 3D-биопринтинг: история формирования направления, принципы и этапы биопечати / Ю.Дж. Хесуани, Н.С. Сергеева, В.А. Миронов [и др.] // Гены & Клетки. 2018. – Т. XIII, № 3. – С. 38–45.*
9. *Технологии биопечати в офтальмологии / С.В. Кравченко, С.Н. Сахнов, В.В. Мясникова [и др.] // Вестник офтальмологии. – 2023. – Т. 139, № 5. – С. 105–112.*
10. *Перспективные технологии 3D биопечати / Д.В. Леонов, Ю.А. Спирина, А.А. Яценко [и др.] // Цитология. – 2021. – Т. 63, № 4. – С. 309–321.*
11. *Derby, B. Printing and Prototyping of Tissues and Scaffolds / B. Derby // Science. – 2012. – Vol. 338, iss. 6109. – P. 921–926.*
12. *Three-Dimensional Fiber Deposition of Cell-Laden, Viable, Patterned Constructs for Bone Tissue Printing / N.E. Fedorovich, J.R. De Wijn, A.J. Verbout [et al.] // Tissue Engineering. Part A: Research Advances. – 2008. – Vol. 14, iss. 1. – P. 127–133.*
13. *Biofabrication of Osteochondral Tissue Equivalents by Printing Topologically Defined, Cell-Laden Hydrogel Scaffolds / N.E. Fedorovich, W. Schuurman, H.M. Wijnberg [et al.] // Tissue Engineering. Part C: Methods. – 2012. – Vol. 18, iss. 1. – P. 33–44.*
14. *Cardiac Tissue Engineering Using Tissue Printing Technology and Human Cardiac Progenitor Cells / R. Gaetani, P. Doevendans, C.H.G. Metz [et al.] // Biomaterials. – 2012. – Vol. 33, iss. 6. – P. 1782–1790.*
15. *3D Printing of Composite Tissue with Complex Shape Applied to Ear Regeneration / J.-S. Lee, J.M. Hong, J.W. Jung [et al.] // Biofabrication. – 2014. – Vol. 6, iss. 2. – 024103.*
16. *Sustained Release of BMP-2 in Bioprinted Alginate for Osteogenicity in Mice and Rats / M.T. Poldervaart, H. Wang, J. van der Stok [et al.] // PLoS One. – 2013. – Vol. 8, iss. 8. – e72610.*
17. *Chondrogenesis of Infrapatellar Fat Pad Derived Adipose Stem Cells in 3D Printed Chitosan Scaffold / K. Ye, R. Felimban, K. Traianedes [et al.] // PLoS One. – 2014. – Vol. 9, iss. 6. – e99410.*
18. *Three-Dimensional Printing of Stem Cell-Laden Hydrogels Submerged in a Hydrophobic High-Density Fluid / D.F. Duarte Campos, A. Blaeser, M. Weber [et al.] // Biofabrication. – 2013. – Vol. 5, iss. 1. – 015003.*
19. *3D Bioprinting Human Chondrocytes with Nanocellulose-Alginate Bioink for Cartilage Tissue Engineering Applications / K. Markstedt, A. Mantas, I. Tournier [et al.] // Biomacromolecules. – 2015. – Vol. 16, iss. 5. – P. 1489–1496.*
20. *Photocrosslinkable Hyaluronan as a Scaffold for Articular Cartilage Repair / D.L. Nettles, T.P. Vail, M.T. Morgan [et al.] // Annals of Biomedical Engineering. – 2004. – Vol. 32. – P. 391–397.*
21. *Photocrosslinkable Hyaluronan-Gelatin Hydrogels for Two-Step Bioprinting / A. Skardal, J. Zhang, L. McCoard [et al.] // Tissue Engineering. Part A: Research Advances. – 2010. – Vol. 16, iss. 8. – P. 2675–2685.*
22. *3D Bioprinting. Science in Space: December 2023 // NASA. – URL: https://www.nasa.gov/missions/station/iss-research/3d-bioprinting/. – Publ. date: 20.12.2023.*
23. *DeMarco, S. 3D Bioprinting Tissues in Space to Heal People on Earth / S. DeMarco // DDN. – URL: https://www.drugdiscoverynews.com/3d-bioprinting-tissues-in-space-to-heal-people-on-earth-1-15845. – Publ. date: 10.01.2024.*
24. *Россия первой в мире напечатает трубчатые органы в космосе при помощи 4D-биопечати // ТАСС. – URL: https://tass.ru/kosmos/19823961. – Дата публ.: 26.01.2024.*
25. *Завершение эксперимента по биопечати мышечной ткани на борту МКС // Zdrav.Expert. – URL: https://clck.ru/3QP5ND (дата обращения: 04.08.2025).*
26. *Еда из 3D-биопринтера: на МКС планируется осуществить биопечать мяса // ИТ-Сервис. – URL: https://it-servis.ru/news.php?id=63109. – Дата публ.: 05.03.2019.*
27. *uSpace – геокосмическая программа безракетного освоения ближнего космоса для спасения жизни на Земле // Юницкий Анатолий Эдуардович. – URL: https://unitsky.engineer/uspace (дата обращения: 04.08.2025).*

28. *Общепланетарное транспортное средство // uSpace. – URL: https://uspaceprogram.com/general_transport?-lang=ru (дата обращения: 04.08.2025).*
29. *Юницкий, А.Э. Программа «ЭкоМир» / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 24–77.*
30. *Общепланетарное транспортное средство и космическое ожерелье «Орбита» как альтернатива ракетному освоению околоземного пространства / А.Э. Юницкий, С.А. Пронкевич, С.В. Артюшевский, В.Л. Лукша // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2021. – Т. 22, №° 4. – С. 364–372.*
31. *Что такое биопринтинг: инновационная технология создания живых тканей и органов // Easy 3D Print. – URL: https://clc.li/mTZgS. – Дата публ.: 01.04.2025.*

Секция

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ГЕОКОСМИЧЕСКИЕ НАУКИ, ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ И РЕСУРСЫ

uSPACE
01

УДК 629.7

Системный анализ проблемы разработки внеземных ресурсов для индустриализации ближнего космоса

В.Ю. Клюшников
академик
Российской академии
космонавтики
им. К.Э. Циолковского,
доктор технических наук

АО «ЦНИИмаш»,
г. Королёв, Россия

Для индустриализации ближнего космоса потребуются ресурсы, включающие в себя не только электрическую энергию, но и воду, азот, инертные газы, железо, никель, редкоземельные элементы и др. Очевидно, что дешевле их добывать в космосе, в частности на астероидах и планетах.

Цель настоящего исследования – всесторонний анализ различных аспектов проблемы разработки внеземных ресурсов, предназначенных для индустриализации ближнего космоса. С системных позиций проанализировано действующее международное законодательство в области космического права, определяющее режим использования Луны и других небесных тел для предотвращения межгосударственных конфликтов и споров. Выделены возможные источники ресурсов Солнечной системы, перспективные для добычи, переработки и использования в интересах индустриализации околоземного пространства. Сформулированы основные требования к внеземным промышленным технологиям, представляющим основу системы разработки внеземных ресурсов для индустриализации ближнего космоса, включающей космические аппараты различного назначения, технологическое оборудование для добычи ресурсов, внеземные производственные и вспомогательные базы и другие объекты. Поставлена задача транспортно-логистического обеспечения доставки добытых ресурсов к месту переработки и использования. Затронуты возможные экологические проблемы Солнечной системы в целом и околоземного пространства в частности, ограничивающие масштабы и способы добычи внеземных ресурсов.

Полученные результаты являются основой для проведения дальнейших исследований затронутой проблемы.

Ключевые слова:
внеземные ресурсы, индустриализация ближнего космоса, космический мусор, разработка внеземных ресурсов.

UDC 629.7

Systems Analysis of Problem of Extraterrestrial Resource Development for Near Space Industrialization

V. Klyushnikov
Academician
of the Russian Academy
of Cosmonautics
named after K.E. Tsiolkovsky,
Dr. of Engineering Sciences

TsNIImash JSC,
Korolev, Russia

The industrialization of near space will require resources that include not only electric energy, but also water, nitrogen, inert gases, iron, nickel, rare earth elements, and others. It is evident that it will be cheaper to extract them in space, particularly on asteroids and planets.

The aim of this study is to conduct a comprehensive analysis of various aspects of extraterrestrial resource development for the industrialization of near space. From the system standpoint, the current international legislation in the field of space law is examined, defining the legal regime for the use of the Moon and other celestial bodies to prevent interstate conflicts and disputes. Possible resource sources within the Solar System that are of value for extraction, processing, and use in the interests of near space industrialization are identified. The basic requirements for extraterrestrial industrial technologies are formulated, which form the basis for a system to develop extraterrestrial resources for industrialization of near space. This includes spacecraft for various purposes, technological equipment for resource extraction, extraterrestrial production and auxiliary bases, and other facilities. The problem of transport and logistics support for the delivery of extracted resources to processing and utilization sites is considered. The potential environmental issues associated with the Solar System as a whole and near-Earth space in particular, which could restrict the scope and techniques for extracting resources from outer space, are discussed.

The results of this study form the basis for further research of the discussed problem.

Keywords:
extraterrestrial resource development, extraterrestrial resources, near space industrialization, space debris.

Введение

К внеземным ресурсам относят вещества и материалы, которые находятся на объектах Солнечной системы (таблица 1).

Таблица 1 – Объекты Солнечной системы [1]

Классы объектов Солнечной системы	Количество
Планеты	8
Спутники планет (включая спутники Земли и карликовой планеты Плутон)	423
Астероиды (включая объекты пояса Койпера, транснептуновые объекты и карликовые планеты)	1 451 731
Кометы (включая фрагменты)	4016

Примечание. По состоянию на 30 мая 2025 г.

Одними из наиболее перспективных объектов разработки внеземных ресурсов являются астероиды. Преимущество добычи полезных материалов на них – отсутствие необходимости глубокого бурения малого небесного тела, поскольку минеральные ресурсы распределены, как правило, равномерно по объёму астероида.

Другой перспективный объект для добычи полезных ископаемых – Луна. Научные исследования показали, что лунный реголит содержит значительное количество редких металлов, таких как иттрий, лантан и самарий. Кроме того, Луна обладает запасами воды, которые могут быть использованы для производства ракетного топлива и обеспечения будущих космических экспедиций.

Ядра комет, представляющие собой смесь льда с вкраплением частиц метеорного вещества (теория «грязного снежка»), вызывают интерес с точки зрения добычи воды в космосе.

Источником ряда металлов и ракетного топлива может служить космический мусор: прекратившие активное существование космические аппараты (КА), отработавшие разгонные блоки и ступени ракет-носителей, а также другие подобные объекты, которые в настоящее время чаще всего уничтожаются путём сведения в плотные слои атмосферы с последующим сгоранием.

Проблема получения внеземных ресурсов, предназначенных для индустриализации ближнего космоса, может быть декомпозирована на задачи:

- проработка правовых и экологических аспектов;
- определение перечня необходимых ресурсов;
- создание технологической базы разведки, разработки, транспортировки, хранения и использования внеземных ресурсов.

Решение перечисленных задач способно в будущем стать основой для переноса вредных, опасных и энергоёмких производств с Земли в околоземное пространство, тем самым обеспечив экологический баланс на нашей планете.

Таким образом, целью настоящей работы является всесторонний анализ проблемы разработки внеземных ресурсов, которые потребуются для индустриализации ближнего космоса.

Правовые аспекты проблемы индустриализации космоса

Вопрос о возможности национального и/или частного присвоения космических ресурсов стал предметом дискуссий ещё в конце 1950-х годов – задолго до принятия Договора о принципах деятельности государств по исследованию и использованию космического пространства, включая Луну и другие небесные тела (1967 г.) [2].

Действующее в настоящее время Соглашение о деятельности государств на Луне и других небесных телах (Agreement Governing the Activities of States on the Moon and Other Celestial Bodies), по сути, запрещает разработку космических ресурсов (принцип неприсвоения) и провозглашает открытость космического пространства и небесных тел для всех государств на основе равенства. Однако этот документ не подписали крупнейшие космические державы – Россия, США и Китай.

Концепция свободного использования небесных тел содержит зародыш конфликта относительно ситуации, когда конкретное государство, реализуя своё право, приступило к практической эксплуатации участка небесного тела.

Действительно, в настоящее время начался процесс трансформации международных представлений о возможности национального и/или частного присвоения космических ресурсов не только на основе анализа норм и доктрин, но также с учётом институциональных изменений и технологических достижений различных стран. Так, Закон США о конкурентоспособности коммерческих космических запусков (2015 г.) [3] направлен на развитие коммерческого исследования и добычи космических ресурсов для удовлетворения национальных потребностей.

В Законе от 20 июля 2017 г. об исследовании и использовании ресурсов космического пространства [4], принятом Люксембургом, установлено, что участвовать в разработке ресурсов вправе любая иностранная компания, имеющая представительство в герцогстве. Миссия Люксембурга в этом плане состоит в выдаче лицензии и последующем мониторинге деятельности компании.

Следом за Люксембургом Объединённые Арабские Эмираты сформировали собственные подходы в части исследования и коммерциализации космических ресурсов. Опасность их бесконтрольной добычи состоит в угрозе рынкам драгоценных металлов и финансовой системе в целом в случае доставки на Землю больших объёмов золота, платины и редких металлов.

Таким образом, добыча и переработка полезных ископаемых в космосе – явление, прогрессирующее и требующее регулирования. Важно установить международно-правовой режим осуществления данных процессов в космосе ещё до возникновения многочисленных международных конфликтов и споров.

Если же иметь в виду разработку космических ресурсов в целях индустриализации ближнего космоса, то в перспективе можно принять соглашение об их исключительном использовании только вне Земли. Доставку указанных ресурсов на планету необходимо ограничить квотами – для удовлетворения потребностей земной экономики и сохранения её финансовой устойчивости и стабильности.

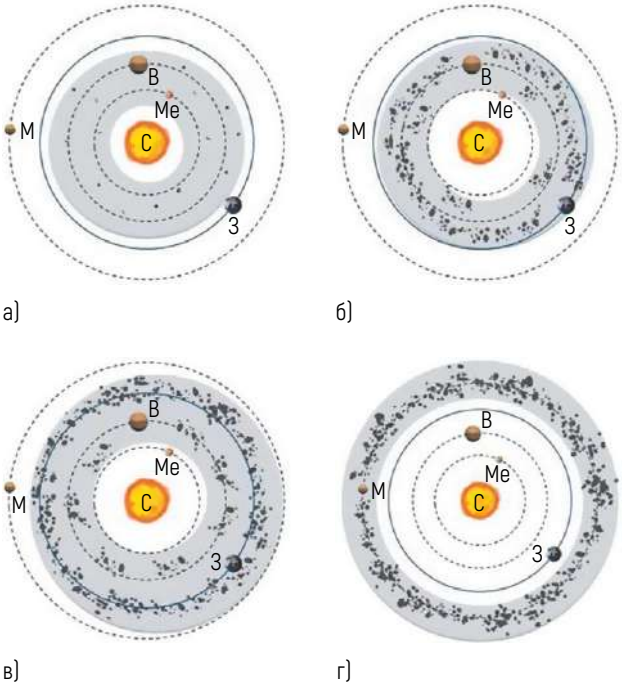
Источники внеземных ресурсов, подлежащие разработке в процессе индустриализации космоса

По данным Лаборатории реактивного движения NASA, в настоящее время в Солнечной системе насчитывается примерно 1,5 млн астероидов, включая астероиды пояса Койпера, находящегося за орбитой Нептуна (30–55 а.е.[1]), а также скопления объектов рассеянного диска (30–900 а.е.) и облака Оорта (55–200 000 а.е.).

Большинство главных потенциальных источников внеземных ресурсов – околоземные объекты: кометы и астероиды, которые вытолкнуты гравитационным притяжением соседних планет на орбиты, позволяющие им войти в окрестности Земли.

[1] Астрономическая единица, определённая Международным астрономическим союзом как 149 597 870 700 м, что соответствует среднему расстоянию между Землёй и Солнцем.

Среди всех околоземных объектов Солнечной системы наибольший интерес представляют астероиды, сближающиеся с Землёй (рисунок 1), условно разделяемые на группы Атиры, Атона, Аполлона, Амура, а также кометы. К настоящему моменту обнаружено более 17 000 подобных объектов [5].



С – Солнце; Ме – Меркурий; В – Венера: З – Земля; М – Марс

Рисунок 1 – Астероиды, сближающиеся с Землёй (области астероидов выделены серым цветом): а – группы Атиры (≈ 14 шт.); б – группы Атона (≈ 750 шт.); в – группы Аполлона (≈ 5000 шт.); г – группы Амура (≈ 3500 шт.)

С точки зрения элементов орбиты перечисленные околоземные объекты – это астероиды и кометы с перигелием q менее 1,3 а.е. Околоземные кометы включают в себя только короткопериодические кометы (орбитальный период $P < 200$ лет). Подавляющее большинство околоземных объектов – околоземные астероиды, разделяемые на группы Атиры, Атона, Аполлона и Амура в соответствии с перигелием q, афелием Q и большой полуосью a.

Потенциально опасные астероиды определяются на основе прогноза опасного сближения с Землёй. В частности, к ним относятся все астероиды с минимальным расстоянием пересечения орбиты Земли MOID ≤ 0,05 а.е. и абсолютной звёздной величиной $H \leq 22$ а.е. (таблица 2).

Таблица 2 – Малые небесные тела, сближающиеся с Землёй [1]

Наименование	Характеристика	Описание
Кометы, сближающиеся с Землёй (near-Earth comets – NEC)	$q < 1{,}3$ а.е. $P < 200$ лет	–
Астероиды, сближающиеся с Землёй (near-Earth asteroids – NEA)	$q < 1{,}3$ а.е.	–
Астероиды группы Атиры	$a < 1$ а.е. $Q < 0{,}983$ а.е.	Астероиды, орбиты которых полностью совпадают с орбитой Земли (названы в честь астероида (163693) Атира)
Астероиды группы Атона	$a < 1$ а.е. $Q > 0{,}983$ а.е.	Астероиды, пересекающие орбиту Земли, большие полуоси которых меньше земных (названы в честь астероида (2062) Атон)
Астероиды группы Аполлона	$a > 1$ а.е. $q < 1{,}017$ а.е.	Астероиды, пересекающие орбиту Земли, большие полуоси которых крупнее земных (названы в честь астероида (1862) Аполлон)
Астероиды группы Амура	$a > 1$ а.е. $1{,}017$ а.е. $< q < 1{,}3$ а.е.	Приближающиеся к Земле астероиды с орбитами, внешними по отношению к Земле, но внутренними по отношению к Марсу (названы в честь астероида (1221) Амур)
Потенциально опасные астероиды (potentially hazardous asteroids – PHA)	MOID ≤ 0,05 а.е. $H \leq 22$ а.е.	Околоземные астероиды, орбита которых допускает приближение к Земле на потенциально опасное расстояние. При этом их размеры достаточно велики, чтобы столкновение могло причинить существенный ущерб

В космосе астероиды располагаются неравномерно. Вблизи точек Лагранжа на орбитах планет Солнечной системы существуют небольшие устойчивые группы астероидов, которые называют «троянцами». Эти группы движутся по орбитам планет на постоянных расстояниях от них.

С точки зрения добычи космических ресурсов представляет интерес следующая классификация астероидов [6]:

- углеродистые (класс C). Содержат большое количество углерода и гидратированных минералов. Распространены во внешней части главного пояса;
- силикатные (класс S). Состоят из железоникелевых сплавов и силикатов, преобладают во внутреннем поясе;
- металлические (класс M). Богаты драгоценными металлами (платина, золото и палладий), никелем и железом, поскольку, вероятно, являлись фрагментами ядер протопланет.

По оценкам специалистов NASA, стоимость астероидов может составлять около 700 квинтлн USD – эта сумма примерно эквивалентна 95 млрд USD для каждого жителя Земли [7].

В таблице 3 приведены примерные данные о массе некоторых астероидов и содержащихся в них полезных ископаемых [8].

Согласно исследованиям, проведённым с помощью запущенной в 2005 г. американской автоматической станции Deep Impact, ядро кометы состоит из рыхлого материала и представляет собой ком пыли с порами, занимающими 80 % его объёма [9].

Таблица 3 – Масса и полезные ископаемые некоторых астероидов

Астероид	Масса, тонн	Основные полезные ископаемые
(16) Психея	$\approx 2{,}27 \times 10^{19}$	Железо, никель, кобальт, платина
(101955) Бенну	$\approx 7{,}8 \times 10^{10}$	Вода, углеродистые соединения, редкие металлы
(433) Эрос	$\approx 6{,}69 \times 10^{15}$	Железо, никель, магний
(162173) Рюгу	$\approx 4{,}5 \times 10^{8}$	Вода, углерод, никель
(1862) Аполлон	$\approx 2 \times 10^{10}$	Силикаты, никель, железо
(1566) Икар	$\approx 6{,}6 \times 10^{11}$	Силикаты, редкие металлы

Из-за высокой эллиптичности орбит для достижения комет нужна скорость, значительно большая, чем для полётов к астероидам. Постоянные испарения газа и пыли на кометах создают угрозу для систем КА и затрудняют навигацию. Однако, несмотря на эти сложности, данные небесные тела остаются источником воды и других важных ресурсов, что делает их потенциально ценными и пригодными для будущих космических миссий и исследований [10].

Планеты также считаются труднодоступными источниками ресурсов, требуемых для индустриализации ближнего космоса, по причине удалённости и необходимости преодоления их притяжения.

Исключение может составить Луна [11], где факторы гравитации и удалённости от Земли проявляются довольно умеренно. На Луне можно добывать воду, платину, золото, редкоземельные элементы, торий, магний, алюминий, кремний, кальций, титан, железо, водород, кислород, азот и др. (рисунок 2) [12].

Кислород	43 %
Кремний	21 %
Алюминий	10 %
Кальций	9 %
Железо	9 %
Магний	5 %
Титан	2 %
Никель	0,6 %
Натрий	0,3 %
Хром	0,2 %
Калий	0,1 %
Марганец	0,1 %
Сера	0,1 %
Фосфор	500 ppm
Углерод	100 ppm
Азот	100 ppm
Водород	50 ppm
Гелий	20 ppm

Рисунок 2 – Химический состав лунной коры

Важным источником ресурсов в космосе может оказаться космический мусор, масса которого на околоземной орбите превысила 6600 тонн (по состоянию на апрель 2025 г.) [13]. На рисунке 3 представлен состав веществ и материалов, содержащихся в космическом мусоре [14].

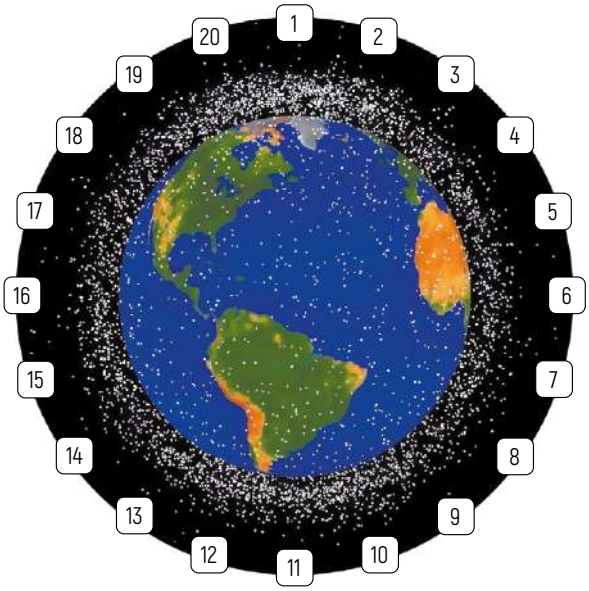


Рисунок 3 – Вещества и конструкционные материалы, содержащиеся в космическом мусоре:
1 – алюминий; 2 – сталь; 3 – жаропрочный сплав; 4 – магний; 5 – титан; 6 – бериллий; 7 – оксид алюминия; 8 – никель, кадмий; 9 – полиэтилентерефталат; 10 – графит; 11 – углерод; 12 – арамидное волокно (кевлар); 13 – стекло; 14 – платина; 15 – полиимид; 16 – маталл; 17 – аэрогели; 18 – германий, галлий, кремний; 19 – иридиум; 20 – жидкокристаллическое полиэфирное волокно (вектран)

Общие требования к технологиям добычи и переработки внеземных ресурсов

Анализ целей, задач и условий добычи и переработки внеземных ресурсов позволяет сформулировать следующие требования к базовым космическим технологиям:

1) минимальные массогабаритные характеристики космического технологического оборудования, поскольку логистические операции в космосе чрезвычайно затратны и цена перемещений грузов зависит от их массы. Так, по данным [15], для обеспечения переработки 1 т/ч горной массы на Луне потребуется доставка основного технологического оборудования массой 1530 тонн (без учёта материалоёмкости сооружений и вспомогательного оборудования),

что эквивалентно затратам на транспортировку – примерно 300 млрд USD;

2) максимально возможное использование ресурсов постоянного потока энергии Солнца как для получения электроэнергии, так и для высокотемпературного нагрева. Приоритетные направления космической горно-перерабатывающей технологии – снижение материалоёмкости, а не энергоёмкости;

3) внедрение адаптированных для космических условий инновационных технологий добычи и переработки ресурсов, в частности руд металлов:

• исключение применения воды при рудоподготовке. Комплексные подходы в поиске новых физических принципов при разработке технологий и оборудования предполагают использование высокоэнергетических методов при бурении и извлечении минеральных ресурсов из недр астероидов и планет [16]. Так, экспериментально подтверждено, что при воздействии импульсного электромагнитного поля на аналог лунного грунта часть физически связанной воды (до 45 %) переходит в свободное состояние [17]. Кроме того, могут иметь место нагрев и испарение горной породы – вплоть до полной сублимации и последующего разделения элементов, а также получения моноатомных веществ [18];

• использование гироскопической силы в условиях пониженной гравитации для создания усилий по дезинтеграции твёрдых материалов. В данном отношении показателен созданный в Институте проблем комплексного освоения недр РАН действующий экспериментальный образец лунной гироскопической горной машины для переработки реголита [19];

• дистанционная экскавация лазерным лучом поверхности небесного тела, например поверхности Луны или астероида для извлечения реголита. В космических исследованиях испарение минералов лазерным излучением применялось марсоходом Curiosity [20]. При должной регулировке энергии лазера экскавация реголита может сопровождаться производственным процессом по выделению из него металлов и кремния [21];

• технология биомайнинга, позволяющая извлекать из астероидов редкоземельные металлы путём их связывания на молекулярном уровне при помощи некоторых видов микроорганизмов, помещаемых в стрессовые условия [22]. На борту МКС продемонстрирована способность *Sphingomonas desiccabilis* извлекать почти 70 % содержавшихся в базальте церия и неодима, причём при любой гравитации [23];

• изготовление конструкционных элементов заданной формы из переработанных металлов или композитов с металлической матрицей, встречающихся в космическом мусоре, методом аддитивного фрикционного перемешивающего осаждения [24];

• переработка космического мусора методом электромагнитного плавления [25];

• технология сбора фрагментов космического мусора, их измельчения и превращения в псевдожидкое топливо для ракетных двигателей КА. Псевдожидкое топливо (или его компонент) состоит из порошкообразных веществ, которые флюидизируются газом с помощью метода кипящего слоя и подаются в камеру сгорания ракетного двигателя аналогично жидкому компоненту. Сжижающим агентом может быть нейтральный газообразный азот, а также активные сжижающие газы (для окислителя – кислород; для горючего – водород) [26];

4) добыча воды как самостоятельное направление разработки внеземных ресурсов. Воду относительно несложно преобразовать в ракетное топливо (водород, кислород). На Луне в районах северного и южного полюсов содержится не менее 1,6 млрд тонн воды в виде льда. Кроме того, воду можно добывать из кометных ядер, в которых она составляет до 80 % массы [27];

5) автоматизация и интеллектуализация процесса добычи минерального сырья в дальнем космосе, что необходимо, в частности, для решения проблемы задержки передачи сигнала с Земли, а также для исключения/минимизации непосредственного присутствия человека при проведении работ. Вероятно, при освоении ресурсов космоса придётся ориентироваться на доставку астероидов и кометных ядер в околоземное пространство автоматическими аппаратами, а разработку сырья из этих космических тел вести вахтовым методом, гарантирующим безопасность космонавтов. В этом случае добыча минерального сырья, например, в лунных шахтах может оказаться намного более перспективной, чем на астероидах [28].

Проблема доставки внеземных ресурсов к месту переработки и дальнейшего использования

Промышленному освоению астероидов и Луны должен предшествовать этап исследований химического и минерального состава пород и разведки залежей. Собранная информация позволит понять, где нужно искать

полезные ресурсы, какими методами предстоит извлекать и обогащать руды металлов и др.

Соответственно, для добычи внеземных ресурсов требуется как минимум два типа КА: предназначенные для разведки космических ресурсов и для их транспортировки. Транспортные КА будут также доставлять к небесным телам Солнечной системы необходимое технологическое оборудование.

Базы переработки, хранения и распределения сырья между промышленными космическими объектами целесообразно размещать в околоземном пространстве, на Луне или в окололунном пространстве. Расстояние от нашей планеты до ближайшей точки в поясе астероидов составляет 1,2 а.е. (180 млн км). Среднее расстояние от Земли до Луны равно 384 400 км.

В качестве средств выведения грузов на земную орбиту в будущем предлагается использовать геоинженерные сооружения типа общепланетарного транспортного средства (ОТС), предложенного около 50 лет назад А.Э. Юницким [29]. До введения в эксплуатацию ОТС можно задействовать средства выведения, созданные по lean-технологии [30]. Однако в транспортно-логистическом обеспечении доставки добытых внеземных ресурсов средства выведения на околоземную орбиту станут играть вспомогательную роль, поскольку речь идёт о деятельности в космосе.

Основа решения задач космической логистики – межорбитальные буксиры, использующие ядерную или электроракетную тягу с питанием от ядерных энергетических источников (рисунок 4).

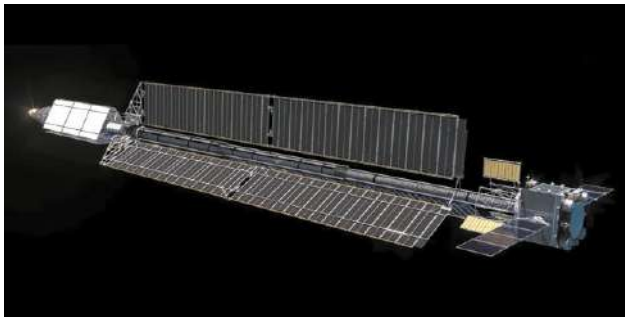


Рисунок 4 – Межорбитальный буксир [31]

В общем случае для межорбитальных/межпланетных буксиров, предназначенных для транспортного сообщения с разрабатываемыми астероидами и Луной, могут применяться различные типы двигательных установок – химические, ядерные или электрические (таблица 4).

Таблица 4 – Оценочные характеристики ракетных двигателей орбитальных буксиров для решения транспортно-логистических задач по перемещению добытых космических ресурсов [32, 33]

Тип ракетного двигателя	Удельный импульс тяги, м/с	Используемое ракетное топливо	Тяга, тс	Ресурс
Химический (жидкостный ракетный)	4500	Кислород + + водород	До 800	До нескольких минут
	3500	Керосин + + кислород		
	3800	Метан + + кислород		
Ядерный (твердофазный)	≈ 10 000	Водород, аммиак (рабочее тело)	> 10	1 ч × 10 включений
Электроракетный	> 50 000	Ксенон, криптон, аргон, аммиак, фторопласт, литий, любые жидкости и газы, а также их смеси	> $1{,}5 \times 10^{-6}$	10 000–50 000 ч

Применение космических аппаратов с химической (жидкостной ракетной) двигательной установкой целесообразно только на этапе исследований (разведки) небесных тел для определения их ресурсной базы.

Электроракетные и ядерные двигатели резко расширяют возможности по транспортировке грузов между Землёй (Луной) и астероидами [5]. Так, уже при настоящем уровне развития ракетно-космической техники в течение одной миссии к Земле (Луне) может быть доставлено более 15 тонн концентрированной руды при начальной массе аппарата на отлётной от Земли траектории 5,5 тонны, включая заправку рабочего тела около 3,6 тонны.

Однако доставка грузов межорбитальным/межпланетным буксиром с электроракетной двигательной установкой требует существенно больших временных затрат по сравнению с буксирами на химических или ядерных двигателях.

Перелёт на астероиды энергетически выгоднее полёта на Луну с посадкой на её поверхность, а доставка груза с них к Земле (Луне) гораздо проще благодаря незначительной силе притяжения на их поверхности.

Структура транспортных потоков при разработке внеземных ресурсов в процессе индустриализации ближнего космоса будет зависеть от выбранных вариантов добычи полезных ископаемых:

- добыча и доставка руды к месту переработки;
- переработка руды на месте добычи с последующей доставкой полученных продуктов;
- перемещение всего астероида к месту переработки.

Выбор варианта зависит от объекта разработки (Луна, астероид, кометное ядро), ценности ресурсов и плотности их распределения в объёме небесного тела; если это астероид, то от его массы, удалённости от Земли (Луны) и других факторов.

В общем случае основными критериями оптимальности выбора маршрутов перемещений добываемых космических ресурсов будут являться затраты энергии и время перелётов.

С точки зрения минимизации энергетических затрат и времени полёта от старта с околоземной орбиты до возвращения к Земле (Луне) наиболее доступными представляются астероиды, плоскости орбит которых пересекаются с эклиптикой под минимальными углами, а афелии орбит максимально близки к орбите Земли [34].

Траектория полёта к астероиду состоит из участков:

- выведения КА на промежуточную орбиту;
- перелёта с промежуточной орбиты в поле тяготения Земли (Луны) на границу её сферы действия в системе «Солнце – Земля»;
- перелёта в поле тяготения Солнца к астероиду.

Для того чтобы перейти на орбиту спутника астероида, в составе траектории полёта предполагаются участки перелёта на траекторию полёта по орбите вокруг астероида, выхода с орбиты спутника астероида за пределы сферы его действия и возвращения к Земле (Луне).

На заключительном этапе возвращения на Землю (Луну) в структуре траектории КА предусматриваются участки входа в сферу действия Земли (Луны) и гашения скорости.

Если минимальное расстояние между Землёй и орбитой астероида меньше радиуса сферы действия Земли, то перелёт к астероиду возможен по эллиптической траектории. Для перелёта на границу сферы действия Земли с любой промежуточной орбиты КА должен достичь орбитальной скорости, которая меньше, чем вторая космическая, поэтому возможен его выход за пределы сферы действия гравитации Земли по эллиптическим геоцентрическим орбитам. Для перелёта на границу сферы действия Земли и выхода за её пределы по эллиптическим орбитам требуются минимальные энергетические затраты. Однако такие перелёты занимают больше времени, чем перелёты по гиперболическим орбитам.

Высококачественная переработка сырья непосредственно на месте добычи позволит снизить затраты на транспортировку добытых материалов, хотя для этого понадобится доставка на астероид дополнительного оборудования.

Экологические аспекты разработки внеземных ресурсов

Важный аспект будущей индустриализации космоса – экология Солнечной системы в целом и околоземного пространства в частности. В процессе добычи и переработки ресурсов небесных тел нашей звёздной системы неминуемо будут образовываться отходы, систему обращения с которыми в космосе ещё только предстоит выстроить. Однако сегодня можно утверждать:

- отходы в околоземном пространстве – это, по сути, космический мусор. Данная проблема уже существует, и она продолжает обостряться, угрожая началом каскадного эффекта взаимных столкновений техногенных фрагментов (эффект Кесслера) и перспективой закрытия выхода в космос: выведенный КА будет почти сразу прекращать существование из-за столкновения с обломком мусора;
- с самого начала размещения промышленной инфраструктуры в космосе нужно говорить об утилизации отходов, т. е. об их использовании для получения какого-либо положительного эффекта. Поскольку в качестве отходов будет рассматриваться лунный (напланетный) или астероидный реголит, то можно предложить применять его как строительный материал для возведения крупных объектов космической инфраструктуры. Альтернатива – спекание пустой породы в относительно крупные небесные тела и отправка их в дальний космос или к Солнцу.

Доступный объём добычи ресурсов астероидов главного пояса в [35] определяется суммарной величиной $2{,}39 \times 10^{23}$ кг при средней плотности 2000 кг/м^3.

По оценкам Смитсоновской астрофизической обсерватории (Кембридж, штат Массачусетс, США) [36], запасы минеральных ресурсов небесных тел Солнечной системы частично истощатся примерно через 500 лет после начала

разработки. При этом получать новые ресурсы будет попросту неоткуда: расстояние до ближайшей к Солнцу звёздной системы Проксима Центавра составляет 4,2 световых года.

По этой причине масштаб разработки космических ресурсов придётся ограничивать, а методы – регламентировать. Ограничения преследуют две задачи: защитить осваиваемые небесные тела Солнечной системы от варварской эксплуатации, имеющей целью добычу ресурсов; избежать катастрофического будущего, в котором все внеземные ресурсы, находящиеся в пределах досягаемости, будут исчерпаны.

В то же время авторы [36] отмечают, что в настоящее время темпы запуска межпланетных миссий не слишком высоки: около 15 миссий в десятилетие. Если такая тенденция сохранится, то нам потребуется 130 лет, чтобы хотя бы по одному разу посетить потенциально пригодные для исследований и разработки небесные тела. Тем не менее, как только появятся нужные технологии, позволяющие быстро, безопасно и эффективно добывать ресурсы на астероидах и планетах, запустится своего рода цепная реакция погони за космическими ресурсами. В связи с этим многие учёные призывают сохранить 85 % ресурсов Солнечной системы нетронутыми, превратив их в подобие национальных парков Земли [37].

Заключение

Проведённый анализ проблемы разработки внеземных ресурсов для индустриализации ближнего космоса позволяет сделать определённые выводы.

1. Источниками внеземных ресурсов будут выступать главным образом астероиды, но также Луна и кометные ядра. Источником некоторых металлов и веществ, а также ракетного топлива (после переработки) может служить космический мусор: прекратившие активное существование КА, отработавшие разгонные блоки, последние ступени ракет-носителей и др.

2. Действующее в настоящее время Соглашение о деятельности государств на Луне и других небесных телах противоречит национальным законодательным актам ряда стран в части добычи и присвоения космических ресурсов. Необходимо установить международно-правовой режим добычи ресурсов в космосе до возникновения конфликтов и споров.

В перспективе, по мере развёртывания промышленных объектов в космосе, было бы целесообразно принять соглашение об исключительном использовании добываемых ресурсов только вне Земли. Их доставку на планету следует квотировать.

3. Анализ целей, задач и условий добычи и переработки внеземных ресурсов позволяет сформулировать основные требования к базовым космическим технологиям:

- минимальные массогабаритные характеристики космического технологического оборудования;
- максимально возможное использование ресурсов постоянного потока энергии Солнца как для получения электроэнергии, так и для высокотемпературного нагрева. Приоритетное направление космической горно-перерабатывающей технологии – снижение материалоёмкости, а не энергоёмкости;
- внедрение адаптированных для космических условий инновационных технологий добычи и переработки ресурсов, в частности руд металлов;
- добыча воды как самостоятельное направление разработки внеземных ресурсов;
- автоматизация и интеллектуализация сложных работ по добыче минерального сырья в дальнем космосе.

4. Для разработки внеземных ресурсов требуется как минимум два типа КА: предназначенные для разведки космических ресурсов и для транспортировки добытого минерального сырья, а также соответствующего технологического оборудования.

Основой транспортно-логистического обеспечения доставки добытых внеземных ресурсов к месту переработки и дальнейшего использования послужат межорбитальные/межпланетные буксиры, оснащённые электроракетной двигательной установкой с питанием от ядерного источника электроэнергии.

Базы переработки, хранения и распределения сырья между промышленными космическими объектами целесообразно размещать в околоземном пространстве, на Луне или в окололунном пространстве.

5. В процессе разработки ресурсов небесных тел нашей звёздной системы неминуемо встанет проблема обращения с отходами – в основном лунным (напланетным) или астероидным реголитом с высоким содержанием кремния, углерода и незначительным количеством элементов и веществ, неперспективных для извлечения и дальнейшей переработки. Такие отходы, видимо, можно будет использовать в качестве строительного материала (например, для создания крупных объектов космической инфраструктуры) или спекать пустую породу в относительно крупные небесные тела и отправлять их в дальний космос или к Солнцу.

6. Запасы минеральных ресурсов небесных тел Солнечной системы могут частично истощиться примерно через 500 лет после начала разработки. В связи с этим ряд учёных призывает сохранить 85 % ресурсов Солнечной системы нетронутыми, превратив их в подобие национальных парков Земли.

Список основных источников

1. *SSD Provides Information Related to the Orbits, Physical Characteristics, and Discovery Circumstances for Most Known Natural Bodies in Our Solar System // Jet Propulsion Laboratory. – URL: https://ssd.jpl.nasa.gov/ (date of access: 30.05.2025).*
2. *Попова, С.М. Регулирование добычи космических ресурсов: создание международного правового обычая / С.М. Попова // Право и политика. – 2022. – № 12. – С. 1–28.*
3. *H.R.2262 – U.S. Commercial Space Launch Competitiveness Act // CONGRESS.GOV. – URL: https://www.congress.gov/bill/114th-congress/house-bill/2262 (date of access: 20.01.2025).*
4. *Law of July 20th 2017 on the Exploration and Use of Space Resources // Luxembourg Space Agency. – URL: https://space-agency.public.lu/en/support/industry-portal/legal-framework/law-of-july-20th-2017.html (date of access: 30.05.2025).*
5. *К вопросу проектирования малых космических аппаратов с электроракетной двигательной установкой для исследований малых тел Солнечной системы / В.М. Кульков, Ю.Г. Егоров, А.М. Крайнов [и др.] // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2015. – № 1 (27). – С. 48–54.*
6. *Добыча полезных ископаемых в космосе: обзор современных исследований и разработок / А.К. Кирсанов, С.А. Вохмин, Г.С. Курчин, Е.П. Волков // Горная промышленность. – 2024. – № 4. – С. 75–80.*
7. *Отчёт Bank of America: 700 квинтиллионов долларов из космоса // Хабр. – URL: https://habr.com/ru/company/edison/blog/438184. – Дата публ.: 30.01.2019.*
8. *Сколько тонн полезных ископаемых и каких содержится в ближайших к Земле астероидах // Академия выживания человечества. – URL: https://vch.academy/metally-v-asteroidax/?ysclid=mapn96v4qa977350258. – Дата публ.: 07.10.2024.*
9. *Deep Impact: A Study on the Impact of Data Papers and Datasets in the Humanities and Social Sciences / B. McGillivray, P. Marongiu, N. Pedrazzini [et al.] // Publications. – 2022. – Vol. 10, iss. 4. – 39. – URL: https://www.mdpi.com/2304-6775/10/4/39 (date of access: 30.05.2025).*
10. *Космическая транспортная система для освоения малых космических тел / С.А. Лемешевский, О.С. Графодатский, А.Е. Ширшаков [и др.] // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2018. – № 2 (40). – С. 47–55.*
11. *США хочет добывать ресурсы на Луне. Что из полезных ископаемых тут есть? // Дзен. – URL: https://dzen.ru/a/XoyFbtEbRFvEZ7nw. – Дата публ.: 07.04.2020.*
12. *MMM Theme Issues: The Lunar Economy – Years 1–25 Dec 1986 – Nov 2011 // The Moon Society. – URL: https://nss.org/wp-content/uploads/Moon-Miners-Manifesto-Lunar-Economy.pdf (date of access: 15.05.2025).*
13. *Котов, П. Масса космического мусора на околоземной орбите превысила 6600 тонн / П. Котов // 3DNews. – URL: https://3dnews.ru/1121448/massa-kosmicheskogo-musora-na-okolozemnoy-orbite-previsila-6600-tonn. – Дата публ.: 17.04.2025.*
14. *Hussein, A.A. Mitigating Space Debris in Low Earth Orbit (LEO) Using High Power Pulsed Lasers / A.A. Hussein // University of Sussex. – URL: https://sussex.figshare.com/articles/poster/Mitigating_space_debris_in_low_earth_orbit_using_high_power_pulsed_lasers/23421896?file=41139044 (date of access: 30.05.2025).*
15. *Городниченко, В.И. Основы горного дела: учебник / В.И. Городниченко, А.П. Дмитриев. – М.: Горная кн., 2008. – 464 с.*
16. *Интенсификация измельчения руд с использованием энергетических воздействий / Е.Л. Чантурия, А.А. Вишкова, П.П. Ананьев [и др.] // Горный журнал. – 2014. – № 12. – С. 63–69.*
17. *Технико-экономические требования к горным процессам и оборудованию при добыче воды из лунного грунта / П.П. Ананьев, К.О. Беляков, П.Н. Иванов [и др.] // Инновации. – 2016. – № 9 (215). – С. 7–10.*
18. *Перспективы развития космической горно-перерабатывающей отрасли / П.П. Ананьев, С.В. Васильев, Р.В. Мещеряков [и др.] // Инновации. – 2016. – № 4 (210). – С. 3–8.*
19. *Бобин, В.А. Гироскопические горные машины для извлечения полезных ископаемых на Земле и Луне / В.А. Бобин, А.В. Бобина. – М.: Библио-Глобус, 2016. – 160 с.*
20. *The ChemCam Instrument Suite on the Mars Science Laboratory (MSL) Rover: Science Objectives and Mast*

Unit Description / S. Maurice, R.C. Wiens, M. Saccoccio [et al.] // Space Science Reviews. – 2012. – Vol. 170, iss. 1–4. – P. 95–166.

21. *Майборода, А.О. Lundust – орбитальный экскаватор для лунных старателей / А.О. Майборода // Воздушно-космическая сфера. – 2018. – № 4 (97). – С. 84–93.*
22. *Макаров, В. Бактерии могут добывать полезные ископаемые даже из астероидов / В. Макаров // TechInsider. – URL: https://www.techinsider.ru/science/news-642383-bakterii-mogut-dobyvat-poleznye-iskopaemye-dazhe-iz-asteroidov/. – Дата публ.: 12.11.2020.*
23. *Space Station Biomining Experiment Demonstrates Rare Earth Element Extraction in Microgravity and Mars Gravity / C.S. Cockell, R. Santomartino, K. Finster [et al.] // Nature Communications. – 2020. – No. 11. – 5523.*
24. *Sustainable In-Space Manufacturing by Upcycling Metal Space Debris via a Vertically Integrated Processing Paradigm / C.R. Baker, N. Zhu, P.K. Ravindranath [et al.] // Research Square. – URL: https://www.researchsquare.com/article/rs-6334841/v1 (date of access: 30.05.2025).*
25. *Space Debris Recycling by Electromagnetic Melting / J.W. Schroeder, G.D. Calnan, A.-A. Bogno [et al.] // Handbook of Space Resources / eds: V. Badescu [et al.]. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-97913-3_7 (date of access: 30.05.2025).*
26. *Баркова, М.Е. Переработка техногенного космического мусора в топливо на низких орбитах / М.Е. Баркова // Труды МАИ. – 2020. – № 110. – URL: https://mai.ru/upload/iblock/f31/Barkova_rus.pdf (дата обращения: 31.05.2025).*
27. *Багров, А.В. Промышленная заготовка водяного льда в космосе / А.В. Багров, В.А. Леонов, М.И. Кислицкий // Воздушно-космическая сфера. – 2019. – № 1 (98). – С. 76–81.*
28. *Багров, А.В. Исследование и промышленное освоение космических ресурсов / А.В. Багров // Воздушно-космическая сфера. – 2020. – № 1 (102). – С. 90–96.*
29. *Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А.Э. Юницкий. – Силакрогс: ПНБ принт, 2019. – 576 с.*
30. *Клюшников, В.Ю. Lean-носитель – основа системы транспортного обеспечения начального этапа индустриализации космоса / В.Ю. Клюшников // Воздушно-космическая сфера. – 2018. – № 3 (96). – С. 38–51.*
31. *Громова, А. «Роскосмос» представит в Дубае макет ядерного буксира «Зевс» / А. Громова // РБК. – URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/25/10/2021/61767d5f9a7947a33ab389f0. – Дата публ.: 25.10.2021.*
32. *Pempie, P. History of the Nuclear Thermal Rocket Propulsion / P. Pempie // Propulsion for Space Transportation of the XXI Century: Proceedings of the 6th International Symposium, Versailles, 14–17 May 2002 / AAAF. – URL: https://www.researchgate.net/publication/320621010_HISTORY_OF_THE_NUCLEAR_THERMAL_ROCKET_PROPULSION (date of access: 29.05.2025).*
33. *Rubinraut, A. The Study on the Electrorocket Engine for the Future / A. Rubinraut // Advances in Aerospace Science and Technology. – 2017. – Vol. 2, No. 1. – P. 1–16.*
34. *Бурдаев, М.Н. Полёты к астероидам / М.Н. Бурдаев // Пилотируемые полёты в космос. – 2011. – № 1 (1). – С. 155–170.*
35. *Cannon, K.M. Precious and Structural Metals on Asteroids / K.M. Cannon, M. Gialich, J. Acain // Planetary and Space Science. – 2023. – Vol. 225. – 105608.*
36. *Elvis, M. How Much of the Solar System Should We Leave As Wilderness? / M. Elvis, T. Milligan // Acta Astronautica. – 2019. – Vol. 162. – P. 574–580.*
37. *Хижняк, Н. Учёные: Добыча полезных ископаемых в космосе очень быстро истощит Солнечную систему / Н. Хижняк // Hi-News.ru. – URL: https://hi-news.ru/technology/uchenye-dobycha-poleznyx-iskopaemyx-v-kosmose-ochen-bystro-istoshhit-solnechnuyu-sistemu.html. – Дата публ.: 14.05.2019.*

УДК 004.358+629.7

Интеллектуальное управление производством космических аппаратов с использованием цифровых двойников

А.В. Рысин

В.П. Кузьменко
кандидат технических наук

А.П. Бобрышов

С.Ю. Лач

О.Я. Солёная
кандидат технических наук

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург, Россия

Исследование направлено на разработку системы управления адаптивным производством космических аппаратов за счёт применения принципов интеллектуального управления, возможностей цифрового моделирования и потенциала автономных роботизированных комплексов. Представленные решения базируются на междисциплинарной методологии, объединяющей теоретические и прикладные аспекты системного анализа, математического моделирования и промышленных ИИ-технологий.

Сделан акцент на том, что развитие программного обеспечения в сфере систем MES, ERP и PLM, а также активизация совершенствования искусственного интеллекта – необходимые условия для создания независимых цифровых экосистем, способствующих возникновению конкурентных преимуществ для эволюции космических технологий в целом. Поднимаются проблемы отсутствия единых стандартов и протоколов взаимодействия между различными системами (MES, ERP, PLM). Обсуждаются трудности внедрения инновационных решений из-за сопротивления со стороны руководства и технических специалистов, привыкших к традиционным методам работы.

Ключевые слова:
гибкость производства, космический аппарат, математическое описание, надёжность, управление, uSpace.

UDC 004.358+629.7

Intelligent Control of Spacecraft Manufacturing Using Digital Twins

A. Rysin

V. Kuzmenko
Ph.D. in Engineering Sciences

A. Bobryshov

S. Lach

O. Solenaya
Ph.D. in Engineering Sciences

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

This study is aimed at developing a control system for adaptive spacecraft manufacturing through the application of intelligent control principles, digital modeling capabilities, and the potential of autonomous robotic complexes. The proposed solutions are based on an interdisciplinary methodology that integrates theoretical and applied aspects of systems analysis, mathematical modeling, and industrial AI technologies.

The paper emphasizes that the development of software in the fields of MES, ERP and PLM, as well as the advancement of artificial intelligence, are essential prerequisites for creating independent digital ecosystems that foster competitive advantages in the overall evolution of space technologies. The issues of the lack of unified standards and interaction protocols between various systems (MES, ERP, PLM) are addressed. The challenges of implementing innovative solutions due to resistance from management and technical specialists accustomed to traditional working methods are also discussed.

Keywords:
control, manufacturing flexibility, mathematical description, reliability, spacecraft, uSpace.

Введение

Индустриализация ближнего космоса неразрывно связана с развитием космической отрасли, которая напрямую зависит от способности производственных систем адаптироваться к стремительно меняющимся технологическим требованиям, обеспечивая высокую точность, надёжность и гибкость при выпуске космических аппаратов (КА). На фоне глобального тренда цифровизации и роботизации промышленности возрастает необходимость в интеграции интеллектуальных технологий управления, позволяющих оперативно реагировать на изменения проектных требований, номенклатуры продукции и внешних условий. Актуальным становится переход от традиционных статичных схем производства к адаптивным моделям, способным к самообучению, прогнозированию и реорганизации процессов в режиме реального времени.

Информационные технологии, такие как цифровые двойники и интеллектуальные роботизированные комплексы, открывают принципиально новые возможности для проектирования систем управления, в которых моделирование, мониторинг и принятие решений осуществляются на основе достоверных цифровых реплик объектов и процессов. Эти технологии позволяют не только повысить производственную эффективность, но и заложить фундамент для полной автоматизации жизненного цикла создания изделий космического назначения – от проектирования до сборки и испытаний.

Настоящее исследование направлено на разработку системы управления адаптивным производством КА, в которой органично сочетаются принципы интеллектуального управления, возможности цифрового моделирования и потенциал автономных роботизированных комплексов. В фокусе – формирование устойчивой и масштабируемой архитектуры управления, способной учитывать индивидуальные особенности каждого производственного цикла и обеспечивать гибкое принятие решений на основе текущих и прогнозируемых данных. Исследование базируется на междисциплинарной методологии, объединяющей теоретические и прикладные аспекты системного анализа, математического моделирования и промышленных технологий искусственного интеллекта (ИИ).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать существующие подходы к автоматизации и цифровизации производственных процессов в космической промышленности;
- разработать концепцию системы управления на основе интеллектуальных роботизированных комплексов и цифрового двойника;
- построить модель адаптивного управления и провести оценку эффективности предложенной системы.

Обзор современного состояния исследований производственных процессов в космической промышленности

Современное развитие космической отрасли характеризуется стремительным переходом от крупносерийного и уникального производства к более гибким, адаптируемым и экономически эффективным решениям. Этот процесс обусловлен как экономическими факторами, так и технологическими прорывами в области микроэлектроники, материаловедения, робототехники и цифровых производственных технологий.

Модульный принцип проектирования

Одним из ключевых трендов стало внедрение модульных принципов проектирования и производства КА. Модульность позволяет унифицировать конструктивные элементы, задействовать типовые платформы и повторно применять проверенные компоненты, что значительно снижает сроки разработки и стоимость производства, а также повышает надёжность систем за счёт использования апробированных решений. Примером могут служить платформы Eurostar E3000 (EADS Astrium) или SmallSat Bus (SpaceX), с помощью которых на основе единой базовой архитектуры изготавливаются спутники различного назначения. Кроме того, модульный подход открывает возможности для лёгкой перенастройки и масштабируемости КА, что особенно важно при создании группировок спутников (например, спутниковых интернет-сетей типа Starlink, OneWeb).

Гибкость производственной системы

Под гибкостью понимается возможность производственной системы быстро адаптироваться к изменяющимся требованиям заказчика, техническим условиям и внешней среде. При высокой динамике рынка космических услуг, где появляются новые задачи – от наблюдения Земли в реальном времени до межпланетных миссий, гибкое производство становится критическим фактором конкурентоспособности.

Гибкость обеспечивается за счёт применения:

- гибких автоматизированных линий;
- программируемых роботов;
- адаптивных информационных систем управления;
- PLM-систем, позволяющих управлять жизненным циклом изделия на всех этапах.

В качестве примера служит опыт предприятий NASA и ESA, где внедряются технологии быстрого прототипирования и производства по требованию, позволяющие оперативно тестировать и изготавливать прототипы космических систем.

В связи с высокой стоимостью вывода полезной нагрузки на орбиту и усложнением функциональных характеристик традиционная массовая серия в космическом производстве всё чаще заменяется на малую серийность. Современные КА создаются под конкретную миссию, что исключает возможность их массового тиражирования. При этом сохраняется необходимость достижения высокой надёжности, точности и качества сборки.

Как упомянуто выше, для удовлетворения данным противоречивым условиям применяются гибкие производственные системы, роботизированная сборка и контроль, аддитивные технологии (3D-печать), цифровой двойник, что позволяет минимизировать ошибки и доработки на стадии проектирования, а также получать сложные детали с минимальными затратами на оснастку.

Примером успешного внедрения является программа Rocket Lab, в рамках которой разработана ракета Electron, предназначенная для запуска небольших спутников и производящаяся серией 20–30 единиц в год, но при этом остающаяся высокотехнологичной и экономически целесообразной.

Интеллектуальные роботизированные комплексы. В современных условиях развития промышленности всё большее значение приобретает автоматизация производственных процессов, которая основана на использовании интеллектуальных роботизированных комплексов, представляющих собой синтез передовых достижений робототехники, ИИ, сенсорных технологий и информационных систем управления. Их внедрение позволяет существенно повысить эффективность, точность и гибкость производственных операций, особенно в высокотехнологичных отраслях, таких как авиационная и машиностроительная промышленность.

В авиационной отрасли, где требования к качеству продукции, безопасности и надёжности предельно высоки, интеллектуальные роботы находят применение на всех этапах жизненного цикла изделия – от проектирования и производства до технического обслуживания и ремонта. Одним из ключевых направлений их использования является автоматизация сборочных процессов, в частности при монтаже крупногабаритных конструкций (фюзеляжи, крылья самолётов и др.). Роботы оснащаются не только традиционными исполнительными механизмами, но и системами технического зрения, позволяющими им адаптироваться к изменению параметров деталей и обеспечивать высокую точность позиционирования, что важно при работе с композиционными материалами, которые всё шире применяются в авиастроении благодаря лёгкости и прочности, однако требуют особого подхода к обработке и монтажу.

Кроме того, в авиации активно развиваются технологии автономного неразрушающего контроля, основанные на использовании мобильных роботизированных платформ. Такие системы способны перемещаться по сложным поверхностям летательных аппаратов и проводить диагностику состояния конструкций без участия человека, что повышает объективность результатов и снижает риск человеческой ошибки. Интеграция методов машинного обучения позволяет подобным комплексам выявлять дефекты и прогнозировать их развитие, тем самым открывая возможности для перехода к предиктивному техническому обслуживанию.

В машиностроительной отрасли интеллектуальные роботизированные комплексы играют важную роль, обеспечивая высокую степень автоматизации, в том числе в серийном и массовом производстве. Здесь они применяются для выполнения операций сварки, покраски, механической обработки, а также для оптимизации управления складскими и транспортными процессами. Современные роботы обладают способностью к адаптации в условиях изменяющейся номенклатуры изделий, что актуально при стремительном развитии концепции гибкого производства. Благодаря датчикам силы и момента, системам компьютерного зрения такие комплексы могут взаимодействовать с человеком в режиме совместной работы (роботы-коллаборaторы), что расширяет границы их применения и делает безопасными для использования в смешанных коллективах.

Технологии цифровых двойников. Ещё одним важным аспектом внедрения интеллектуальных роботизированных комплексов является их интеграция в цифровые экосистемы предприятия, такие как цифровой двойник и интернет вещей. Это позволяет управлять работой роботов удалённо и анализировать большие объёмы данных, собранных в реальном времени, с целью оптимизации производственных процессов. Подключение к единой информационной системе обеспечивает полноту учёта параметров технологических операций и возможность осуществления замкнутых контуров управления, в которых сведения о состоянии оборудования и качестве выпускаемых изделий используются для корректировки параметров процесса.

Сегодня на производстве повсеместно применяют технологии цифровых двойников, представляющих собой виртуальные модели физического объекта, процесса или системы, которые динамически отражают их состояние

в реальном времени. Эти модели строятся на основе непрерывного потока данных, исходящих от сенсоров и других источников информации, установленных на самом объекте или в его окружении. Благодаря тесной связи между физическим и виртуальным миром цифровой двойник выступает мощным инструментом для анализа, прогнозирования поведения объекта, а также управления его функционированием на всех этапах жизненного цикла – от проектирования и производства до эксплуатации и утилизации [1].

Одно из ключевых преимуществ концепции цифрового двойника – возможность проведения симуляций различных сценариев без вмешательства в реальный производственный процесс. Это позволяет заранее выявлять потенциальные проблемы, оптимизировать параметры функционирования оборудования и разрабатывать более эффективные стратегии технического обслуживания. Такой подход особенно важен в высокотехнологичных и капиталоёмких отраслях, где даже незначительные ошибки могут привести к существенным финансовым потерям или снижению уровня безопасности.

В промышленности цифровой двойник широко применяется как на уровне отдельных станков и механизмов, так и в масштабах целых производственных линий и предприятий. В частности, в машиностроении он используется для моделирования работы сложного технологического оборудования, что позволяет предсказывать моменты выхода из строя и планировать техническое обслуживание заблаговременно, исключая простой и связанные с ним затраты. В авиационной промышленности цифровые двойники применяются для мониторинга состояния двигателей и других агрегатов летательных аппаратов, гарантируя безопасность полётов и продлевая срок их службы за счёт персонализированного графика обслуживания.

Кроме того, важной областью привлечения цифрового двойника является управление жизненным циклом продукции. Виртуальная модель обуславливает создание единой информационной среды, в которой проектные решения могут быть протестированы ещё до начала производства, а в дальнейшем – корректироваться в зависимости от того, как покажет себя реальное изделие при эксплуатации. В результате ускоряется вывод новых продуктов на рынок и повышается их конкурентоспособность.

Вместе с тем цифровой двойник играет ключевую роль в воплощении концепции «Индустрия 4.0» [2], обеспечивая интеграцию различных систем и устройств в рамках единого цифрового пространства предприятия, что подразумевает использование современных технологий: интернета вещей, больших данных, ИИ и облачных вычислений. Эти элементы функционируют комплексно, поддерживая актуальность информации, обрабатывая её и генерируя управленческие решения, основанные на точных аналитических сведениях.

Таким образом, концепция цифрового двойника становится не только вспомогательным инструментом, но и стратегическим элементом цифровой трансформации промышленности, открывая новые возможности для повышения гибкости, устойчивости и эффективности производственных систем, а также позволяя предприятиям адаптироваться к быстро меняющимся рыночным условиям и технологическим вызовам [3].

Применение системы управления адаптивным производством в околоземном пространстве

Рассмотренные выше исследования в основном описывают работы по совершенствованию производства космических объектов на Земле. Однако не следует забывать и о возможностях применения указанной системы в околоземном пространстве. В первую очередь нужно обратить внимание на концепцию, представленную белорусским инженером А.Э. Юницким [4, 5], который предложил программу безракетной индустриализации ближнего космоса uSpace. В рамках данного проекта планируется создание космических устройств, объединённых в индустриальное ожерелье «Орбита» – транспортно-инфраструктурный и индустриально-жилой комплекс, размещённый на высоте 400–500 км.

Системы управления производством космических объектов могут быть использованы для реализации программы uSpace при организации технологических процессов на околоземной орбите, а также при разработке элементов общепланетарного транспортного средства [6] на Земле.

Системы управления производством: MES, ERP, PLM

В условиях стремительного развития цифровых технологий и роста требований к эффективности, гибкости и прозрачности производственных процессов всё большее значение приобретают интегрированные информационные системы управления, среди которых выделяются MES (управление производством), ERP (планирование ресурсов предприятия) и PLM (управление жизненным циклом продукта). Каждая из них играет свою роль в обеспечении комплексного мониторинга предприятия и его

производственных активов. Эти системы не только автоматизируют отдельные функциональные зоны, но и организуют взаимодействие между ними, создавая целостную информационную среду, необходимую для принятия обоснованных управленческих решений.

MES-системы ориентированы на оперативное управление производственными процессами и выполнение задач контроля в реальном времени; служат связующим звеном между высоким уровнем планирования, представленным ERP-системами, и непосредственно технологическим оборудованием, работающим в цехах. MES позволяют отслеживать осуществление производственных заданий, контролировать параметры технологических процессов, учитывать расход сырья и материалов, а также обеспечивать соответствие выпускаемых изделий установленным стандартам качества. Благодаря этим преимуществам предприятия получают возможность повысить прозрачность производственных операций, сократить простои, минимизировать ошибки и улучшить общую эффективность использования ресурсов.

ERP-системы охватывают более широкий спектр функций и предназначены для стратегического и тактического управления ключевыми бизнес-процессами; объединяют в себе финансовый, логистический, кадровый и производственный учёт, гарантируя согласованное функционирование различных подразделений компании. В контексте производства ERP-системы обеспечивают планирование потребности в материалах, организацию производственных заказов, управление запасами и распределение ресурсов. Интеграция данных из разных источников позволяет руководству получать актуальную информацию для анализа состояния дел и прогнозирования дальнейшего развития событий. Таким образом, ERP становится основой корпоративной системы управления, повышая конкурентоспособность за счёт оптимизации внутренних процессов и улучшения координации между всеми уровнями.

PLM-системы сосредоточены на управлении жизненным циклом изделия – от этапа проектирования до вывода продукции с рынка и утилизации; предоставляют платформу для хранения, обмена и обработки информации, связанной с проектными данными, технической документацией, изменениями в конструкции и нормативно-справочными материалами. PLM-системы обеспечивают единое представление о продукте на всех стадиях его существования, что важно при работе над сложными изделиями, требующей множества специалистов из разных областей. Кроме того, PLM способствует сокращению сроков вывода новых продуктов на рынок, снижению количества ошибок в проектных решениях и повышению качества конечной продукции за счёт эффективного управления изменениями и инженерными данными.

В совокупности MES-, ERP- и PLM-системы образуют многоуровневую архитектуру управления предприятием, где каждый уровень отвечает за свой круг задач, но при этом тесно взаимодействует с другими (рисунок 1). Их интеграция позволяет достичь полной прозрачности и согласованности процессов, начиная от замысла создания нового изделия и заканчивая его массовым выпуском и эксплуатацией, что делает такие системы важнейшим элементом цифровой трансформации современного производства, обеспечивая переход к более высокой степени автоматизации, гибкости и управляемости промышленных предприятий.

Производство КА относится к одной из самых технологичных и наукоёмких отраслей промышленности, где предельно высоки требования к надёжности, точности и качеству продукции. Однако, несмотря на значительные достижения в этой сфере, до сих пор существуют серьёзные пробелы, которые ограничивают эффективность, гибкость и конкурентоспособность современных производственных систем. Вместе с тем открываются широкие возможности для внедрения инновационных подходов, технологий и методов управления [7].

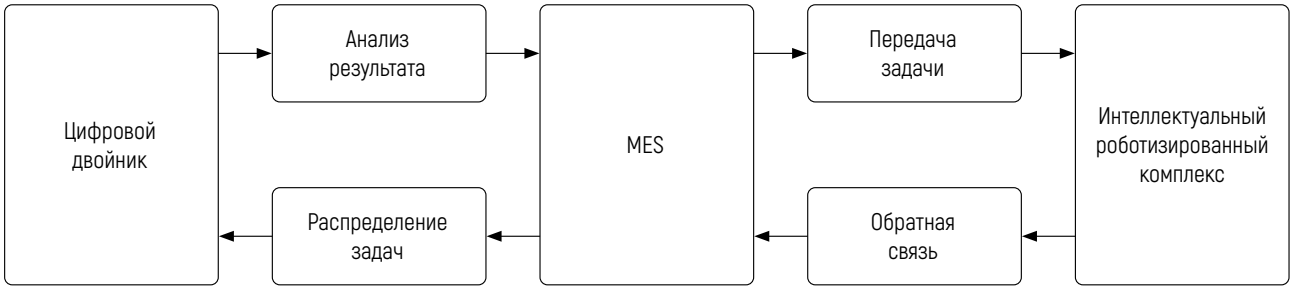


Рисунок 1 – Архитектура управления предприятием

Ключевой проблемой в производстве КА остаётся недостаточная цифровизация и автоматизация процессов. Многие этапы создания космической техники всё ещё зависят от ручного труда или полуавтоматических операций, что увеличивает вероятность человеческой ошибки, замедляет процессы изготовления и повышает себестоимость продукции. Наличие отдельных передовых разработок не привело к повсеместному внедрению таких технологий, как интеллектуальные роботизированные комплексы, системы технического зрения и адаптивные производственные линии. Это связано не только с техническими сложностями, но и с недостатком нормативной технической базы, а также с ограниченным опытом эксплуатации подобных систем в условиях высоких требований к безопасности и надёжности.

Существенным пробелом является также отсутствие полной интеграции информационных систем на всех стадиях жизненного цикла изделия. Хотя предприятия уже используют MES-, ERP- и PLM-системы, уровень их взаимодействия между собой и с реальными производственными активами часто остаётся низким, что приводит к дублированию данных, задержкам в принятии решений и снижению общей управляемости процессами. В случае когда сроки разработки и производства КА могут исчисляться годами, подобная фрагментированность становится серьёзным препятствием на пути к более быстрому выводу новых продуктов на рынок.

Кроме того, в области управления проектами и рисками наблюдается недостаточно развитая культура использования аналитики больших данных и предиктивных моделей. Современные методы ИИ и машинного обучения позволяют прогнозировать поведение сложных технических систем, выявлять потенциальные отказы на ранних этапах и оптимизировать параметры конструкций. Однако в практике создания КА такие подходы применяют выборочно, преимущественно ограничиваясь отдельными подсистемами или опытными образцами. Полномасштабное внедрение указанных технологий может значительно повысить надёжность изделий и снизить затраты на испытания и доводку.

Не менее важным представляется развитие гибких производственных систем, способных быстро адаптироваться к изменяющимся требованиям заказчиков и условиям внешней среды. Традиционная практика в проектировании и производстве КА ориентирована на серийное или даже уникальное изготовление, что делает её малопригодной для массового производства спутников и других элементов инфраструктуры космических систем нового поколения. Переход к модульным платформам, аддитивным технологиям и цифровым двойникам позволяет вырабатывать более унифицированные и экономически целесообразные решения, однако реализация этого потенциала требует пересмотра текущей стратегии в организации производства и управлении проектами.

Следовательно, анализ сегодняшнего состояния процессов в области создания КА демонстрирует наличие значительных возможностей для технологического прорыва, связанных с углублённой цифровизацией, автоматизацией, интеграцией информационных систем, внедрением методов ИИ и переходом к гибким и масштабируемым производственным моделям. Воплощение данных инноваций обеспечит повышение эффективности и качества выпускаемых изделий, укрепит позиции предприятий в условиях возрастающей конкуренции на глобальном рынке космических технологий.

Концепция системы управления адаптивным производством космических аппаратов

Создание современной системы управления адаптивным производством КА предполагает построение гибкой, информационно насыщенной и технологически продвинутой среды, способной оперативно реагировать на изменяющиеся внешние и внутренние факторы. Такая система должна обеспечивать не только выполнение строгих требований к надёжности и качеству выпускаемых изделий, но и поддержку динамичного развития производственных процессов в условиях высокой сложности, уникальности продукции и ограниченных объёмов выпуска.

Основой концепции системы управления адаптивным производством КА выступает принцип интеграции всех уровней управления – от стратегического планирования до оперативного контроля исполнения технологических операций. Система ориентирована на построение единого цифрового пространства предприятия, где данные о состоянии проекта, оборудования, материалов и персонала собираются, обрабатываются и используются для принятия решений в режиме, близком к реальному времени. Это позволяет минимизировать временные задержки, снизить вероятность ошибок и повысить общую управляемость производственным циклом.

Центральным элементом концепции является переход к модели адаптивного управления, при которой система способна самостоятельно или с минимальным участием человека корректировать параметры производственного

процесса в ответ на внешние воздействия – изменение в технических требованиях, образование дефектов в материалах, колебание в поставках комплектующих или возникновение аварийной ситуации. Для реализации такого принципа необходимо сочетание передовых алгоритмов анализа данных, методов ИИ и систем поддержки принятия решений.

Кроме того, важное значение имеет обеспечение полной прозрачности и прослеживаемости всех этапов производства, начиная от проектирования и заканчивая финальными испытаниями изделия. Это достигается за счёт глубокой интеграции с MES-, ERP- и PLM-системами, а также внедрением технологии цифрового двойника, которая позволяет создавать виртуальные прототипы как отдельных узлов КА, так и изделия в целом. Благодаря этому становится возможным прогнозирование поведения конструкции ещё до начала физического изготовления, что существенно снижает риски возникновения критических отклонений в ходе производства.

Таким образом, концепция системы управления адаптивным производством КА направлена на формирование устойчивой, саморазвивающейся и интеллектуально управляемой среды, способной эффективно функционировать в условиях высокой неопределённости и сложности. Она ставит своей задачей преодолеть традиционные ограничения, связанные с жёсткими технологическими маршрутами, низкой скоростью реакции на изменения и недостаточной степенью автоматизации, открывая путь к новому качеству организации производства в космической отрасли.

Архитектура системы управления адаптивным производством КА представляет собой многоуровневую, модульную структуру, объединяющую аппаратные, программные и организационные компоненты в единую информационно-технологическую среду. Основная цель – обеспечение согласованного взаимодействия между различными уровнями управления, начиная от стратегического планирования и заканчивая непосредственным исполнением технологических операций на производственном участке, как показано на рисунке 2.

На верхнем уровне (стратегический) архитектура включает стратегические и тактические модули, отвечающие за долгосрочное планирование, распределение ресурсов и координацию проектов. Эти модули взаимосвязаны с ERP-системами и другими корпоративными решениями, организуя единое информационное поле для управления бизнес-процессами и производственными задачами. Интеграция с внешними системами заказчика и поставщиков своевременно синхронизирует требования и поставки, что важно в условиях длительных циклов создания КА.

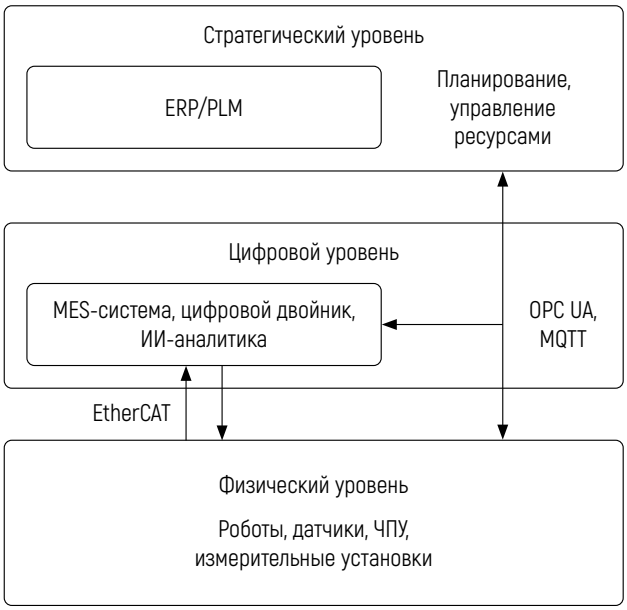


Рисунок 2 – Структура системы управления

Средний уровень (цифровой) архитектуры сосредоточен на оперативном управлении производственными процессами и осуществляется через MES-платформы. Здесь происходит сбор и анализ данных в реальном времени, мониторинг состояния оборудования, учёт использования материалов и контроль соблюдения технологических регламентов. Особое внимание уделяется обратной связи между физическим производством и цифровыми моделями, что позволяет оперативно вносить коррективы в процессы и предотвращать потенциальные отклонения.

Нижний уровень (физический) предназначен для непосредственного взаимодействия с производственными активами – станками, роботами, измерительными устройствами и др. Он обеспечивает сбор первичных сведений, их обработку и передачу на вышестоящие уровни, а также реализует функции локального управления и автоматизации. Благодаря использованию современных коммуникационных протоколов – OPC UA, MQTT и др. – достигается устойчивый и безопасный обмен информацией между участниками производственного процесса.

Дополнительно в архитектуре предусматривается интеграция с PLM-системами, что обуславливает сквозное управление данными изделия на всех этапах его жизненного цикла. Это позволяет согласовывать проектные решения с технологическими возможностями производства, минимизировать количество доработок и ускорять вывод новых продуктов на рынок.

Общая структура системы управления дополняется аналитическими и прогностическими модулями, основанными на применении методов ИИ и машинного обучения. Они обеспечивают не только текущий контроль, но и прогнозирование вероятных отклонений, оптимизацию параметров процессов и поддержку принятия решений в условиях неопределённости.

Физический уровень представляет собой материальную базу всей системы управления адаптивным производством и включает совокупность оборудования, механизмов, исполнительных устройств и сенсорных систем, непосредственно взаимодействующих с физическим процессом изготовления КА. Именно на этом уровне осуществляются реальные технологические операции – от механической обработки и сварки до сборки, контроля качества и испытаний. Его эффективность напрямую влияет на точность, скорость и надёжность выпускаемых изделий.

Центральным элементом физического уровня являются роботизированные комплексы, которые обеспечивают высокую степень автоматизации и гибкости при выполнении сложных и трудоёмких операций. При производстве КА, где нужна предельная точность и предусматривается минимальное участие человека из-за строгих требований к чистоте, безопасности и стабильности параметров, такие комплексы играют ключевую роль. Современные роботы оснащаются адаптивными приводами, системами технического зрения и возможностью взаимодействия с цифровыми двойниками, что позволяет оперативно подстраиваться под изменяющиеся условия и гарантировать стабильное качество выполняемых работ.

Не менее важным компонентом выступают датчики и измерительные устройства, отвечающие за непрерывный мониторинг параметров как самого производственного процесса, так и состояния используемого оборудования. Эти устройства формируют поток сообщений о температуре, давлении, усилии, положении инструментов, деформации материалов и др. Интеграция с аналитическими модулями создаёт условия для регистрации актуальных данных и прогнозирования возможных отклонений, предотвращая возникновение брака или выход техники из строя.

Оборудование, составляющее физический уровень, включает в себя станки с числовым программным управлением, лазерные установки, 3D-принтеры, стенды для термо- и вакуумных испытаний, а также специализированные монтажные и позиционирующие устройства. Большое внимание уделяется их способности к цифровому взаимодействию и интеграции в общую систему управления. Это достигается за счёт применения современных коммуникационных протоколов, например OPC UA, PROFINET, EtherCAT, которые обеспечивают устойчивый обмен данными между физическими активами и верхними уровнями управления (рисунок 2).

Внедрение адаптивного подхода на физическом уровне предполагает не просто автоматизацию существующих операций, но и создание условий для их динамической перенастройки в зависимости от изменений в проектной документации, поставках комплектующих или состоянии оборудования. Подобная реактивность возможна благодаря тесной связи с цифровыми двойниками, системами ИИ и платформами управления жизненным циклом изделия.

Физический уровень системы управления адаптивным производством КА является ключевой частью, отвечающей за преобразование цифровых команд в реальные действия. Его развитие направлено на повышение точности, устойчивости и скорости выполнения технологических операций, а также на обеспечение полной синхронизации между физическим производством и цифровыми моделями, что в свою очередь открывает возможности для полноценной цифровой трансформации космической отрасли.

Цифровой уровень системы управления адаптивным производством КА представляет собой виртуальную среду, в которой физические процессы и объекты производства находят своё отражение в виде цифровых моделей. На этом уровне осуществляются интеграция данных, симуляция процессов, прогнозирование поведения систем и поддержка принятия управленческих решений. Центральным элементом выступает концепция цифрового двойника, которая становится значимым инструментом для гибкости, точности и эффективности производства.

Одна из главных функций цифрового двойника – обеспечение сквозного цифрового моделирования и симуляции производственных операций, благодаря чему можно заранее протестировать различные сценарии выполнения работ, выявить потенциальные проблемы и оптимизировать параметры технологических процессов ещё до начала их реализации. Это значительно снижает риск возникновения ошибок, уменьшает объём корректировок и сокращает сроки вывода продукции на рынок.

Кроме того, цифровой двойник служит основой для проведения аналитики и прогнозирования. Использование методов ИИ и машинного обучения позволяет не только анализировать текущее состояние оборудования и качество выпускаемых изделий, но и предсказывать возможные отклонения, отказы или изменения в характеристиках материалов. Такое решение способствует переходу к предиктивному

управлению, когда действия предпринимаются заранее, до возникновения критической ситуации, что существенно в условиях длительных циклов создания КА.

Важная роль цифрового уровня – обеспечение полной прозрачности и прослеживаемости всех этапов производства. Цифровой двойник может отобразить историю изменений конструкции, параметров технологических режимов, результатов контроля и испытаний, а также взаимосвязь между различными подсистемами. В итоге готовится основа для повышения ответственности, улучшения качества документирования и соблюдения нормативных требований, характерных для космической отрасли.

Цифровой уровень координирует работу с другими компонентами системы управления, такими как MES, ERP и PLM, что приводит к согласованности действий на всех этапах жизненного цикла изделия. Интеграция с этими платформами создаёт единую информационную среду, в которой данные о проекте, производственных ресурсах, графиках и результатах исполнения операций используются для стратегического планирования, оперативного управления и долгосрочного развития предприятия.

ИИ становится ключевым элементом современных систем управления адаптивным производством КА, обеспечивая качественно новый уровень автоматизации, анализа данных и поддержки принятия решений. При высокой сложности, уникальности изделий и строгих требованиях к надёжности и безопасности традиционные методы управления часто не позволяют оперативно реагировать на изменяющиеся условия. Именно здесь ИИ выступает как мощный инструмент, умеющий обрабатывать большие объёмы разнородной информации, выявлять скрытые закономерности и давать рекомендации, основанные на точном прогнозировании и оптимизации процессов.

Главная функция ИИ в рассматриваемой области – аналитическая поддержка управленческих решений. Благодаря непрерывному потоку данных, поступающих с физического уровня (от датчиков, роботизированных комплексов и испытательных стендов), системы ИИ способны оценивать текущее состояние производства, обнаруживать аномалии, предсказывать вероятные отклонения и предлагать варианты корректирующих действий. Это даёт возможность руководству предприятий принимать более обоснованные и своевременные решения, минимизируя риск возникновения критических ситуаций и снижая затраты на корректировку и повторные испытания.

Значимая область применения ИИ – оптимизация технологических процессов. Сложные алгоритмы машинного обучения и глубокого анализа данных позволяют находить предпочтительные параметры обработки материалов, маршруты сборки, режимы испытаний и другие технологические переменные. Такие системы могут адаптироваться к изменению условий в реальном времени, что важно при производстве уникальных или малосерийных изделий, где классические подходы к стандартизации и массовому производству оказываются недостаточно эффективными.

Кроме того, ИИ играет центральную роль в предиктивном управлении, включая прогнозирование состояния оборудования, сроков выполнения задач и функционирования конструкций КА в различных условиях. Посредством интеграции ИИ с цифровыми двойниками можно моделировать поведение изделия ещё до его физического изготовления, тем самым предотвращая появление потенциальных проблем уже на этапе проектирования.

Важное значение имеет применение ИИ в управлении проектами и рисками (стратегический уровень системы управления). Современные технологии позволяют анализировать исторические данные, оценивать вероятность возникновения задержек, сбоев или отклонений в графиках и бюджетах, а также формировать рекомендации по минимизации их влияния. Это делает процесс создания КА более предсказуемым и контролируемым, что особенно актуально при длительных циклах разработки и высокой стоимости ошибок.

Моделирование и проектирование цифрового двойника

Создание цифрового двойника для производственных процессов изготовления КА представляет собой сложный и многоэтапный процесс, требующий глубокой интеграции данных, технологий моделирования и управленческих решений.

Первый этап – определение целей и области применения цифрового двойника, что предполагает выявление первостепенных задач, которые необходимо решить (оптимизация технологических операций, прогнозирование состояния оборудования, поддержка принятия управленческих решений и др.). От правильного понимания потребностей зависит выбор масштаба модели – от отдельного станка до производственной линии или даже предприятия в целом.

Далее следует построение информационной базы и сбор исходных данных, включающих проектную документацию, параметры технологических процессов, сведения о материалах, характеристики оборудования и реальных условий эксплуатации. Большое внимание уделяется обеспечению

точности и актуальности информации, поскольку именно она становится фундаментом для создания достоверной цифровой модели.

На следующем этапе осуществляется разработка и верификация виртуальной модели, которая должна максимально точно воспроизводить поведение физического объекта или процесса. Для этого используются современные методы компьютерного моделирования, в том числе геометрическое представление, динамическое поведение, термические и силовые характеристики. Модель постоянно корректируется и дополняется на основе новых данных, поступающих из реального производства.

Особое место занимает интеграция цифрового двойника с существующими информационными системами предприятия, такими как MES, ERP и PLM. Это позволяет построить единую цифровую среду, где информация между различными уровнями управления циркулирует бесперебойно, обеспечивая согласованность действий и возможность сквозного контроля на всех стадиях жизненного цикла изделия.

Завершающий этап – внедрение механизма обратной связи и динамической адаптации, при котором модель отражает текущее состояние и активно влияет на него. За счёт использования методов ИИ и аналитики больших данных цифровой двойник становится инструментом не только мониторинга, но и прогнозирования, а также автоматической корректировки параметров производственного процесса в ответ на внешние и внутренние изменения.

Моделирование технологических процессов играет ключевую роль в создании цифрового двойника и обеспечении адаптивного управления производством, позволяя заранее прогнозировать поведение сложных систем, оптимизировать параметры обработки и сборки, обнаруживать потенциальные проблемы до их возникновения. В зависимости от целей и уровня детализации известны различные подходы к моделированию, каждый из которых имеет свои особенности и области применения.

Одним из наиболее распространённых методов является физическое моделирование, при котором воспроизводятся реальные физические процессы – термическая нагрузка, механическая деформация, динамика движения инструментов или взаимодействие материалов. Такой подход незаменим при разработке сварочных, паяльных и механических операций, где нужно учитывать поведение конструкционных материалов под влиянием внешних факторов [8].

Важное направление в данной области – математическое моделирование, основанное на применении аналитических и численных методов для описания технологических процессов, в частности метода конечных элементов, позволяющего оценивать напряжённо-деформированное состояние деталей, и метода конечных объёмов, используемого при моделировании тепловых и гидродинамических процессов. Эти прикладные инструменты актуальны при проектировании и испытании компонентов КА, работающих в экстремальных условиях.

Следует отметить имитационное моделирование, которое показывает логистику и последовательность операций на производственных участках. Оно помогает анализировать загрузку оборудования, распределение ресурсов и временные затраты на выполнение различных этапов производства. Посредством дискретно-событийного моделирования выявляются узкие места и оптимизируются производственные потоки без вмешательства в реальный процесс.

Кроме того, всё большее значение приобретает объектно-ориентированное моделирование, основанное на использовании языков UML или SysML. Благодаря ему можно структурировать описание технологических процессов, отобразить их в виде диаграмм и сценариев поведения, что важно при разработке сложных, многокомпонентных изделий, таких как КА. Этот подход содействует унификации данных и улучшает коммуникацию между различными участниками проекта.

Для формализации процесса моделирования сборки КА в рамках цифрового двойника и адаптивного производства используется математический аппарат, охватывающий геометрическое представление объектов, их динамическое поведение, параметры взаимосвязи и оптимизационные задачи [9].

Каждый компонент КА B_i рассматривается в трёхмерном пространстве как твёрдое тело с заданными размерами, формой и положением:

$$B_i = (r_i(t),\ R_i(t),\ V_i(x, y, z)),$$

где $r_i(t)$ – координаты центра масс i-го элемента в момент времени t;

$R_i(t)$ – ориентация (матрица поворота или кватернион);

$V_i(x, y, z)$ – объёмное представление геометрии детали.

Проверка интерференций между элементами реализуется через вычисление расстояния между поверхностями p и q:

$$d_{ij}(t) = \min_{p,\, q \in \partial B_i} \|p - q\|.$$

Если $d_{ij}(t) < 0$, имеет место пересечение (конфликт, ошибка), что недопустимо при сборке.

Для описания движения автоматизированных манипуляторов, участвующих в сборке, применяются уравнения кинематики и динамики многозвенных механизмов [10].

Прямая кинематика определяет положение инструментальной точки (tool center point – TCP):

$$T_{TCP}(\theta) = f(\theta),$$

где $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_n)^T$ – вектор обобщённых координат (углы вращения в шарнирах);

$f(\theta)$ – нелинейная функция, определяемая структурой манипулятора (по методу Денавита – Хартенберга).

Обратная задача кинематики решается для достижения целевой позиции:

$$\theta^* = \arg\min_{\theta} \| T_{TCP}(\theta) - T_{target} \|^2.$$

Динамика движения описывается уравнениями Лагранжа второго рода (рисунок 3):

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta) = \tau,$$

где $M(\theta)$ – матрица инерции;

$C(\theta)$ – матрица кориолисовых и центробежных сил;

$g(\theta)$ – вектор сил тяжести;

τ – вектор управляющих моментов.

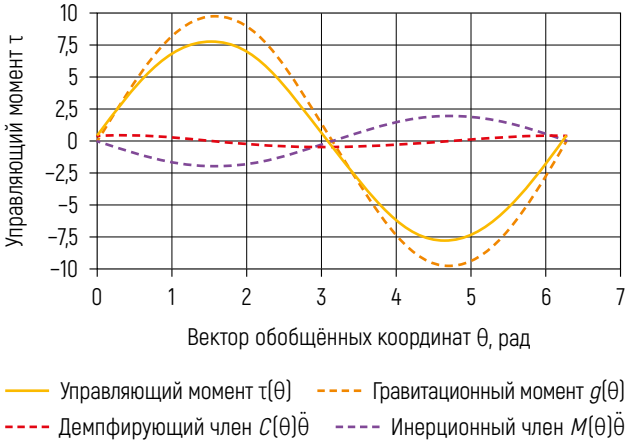


Рисунок 3 – График динамики движения

Определение оптимальной последовательности установки компонентов может быть сформулировано как задача дискретной оптимизации:

$$\sigma^* = \arg\min_{\sigma \in S}(J(\sigma)),$$

где σ – перестановка порядка установки компонентов;

S – множество допустимых последовательностей (с учётом технологических ограничений);

$J(\sigma)$ – целевая функция, учитывающая такие параметры, как время сборки, сложность доступа, риск интерференции.

Целевая функция может включать суммарное время выполнения операций, количество переустановок оборудования и уровень сложности взаимодействия между компонентами.

Взаимодействие между деталями и инструментами моделируется через контактную механику:

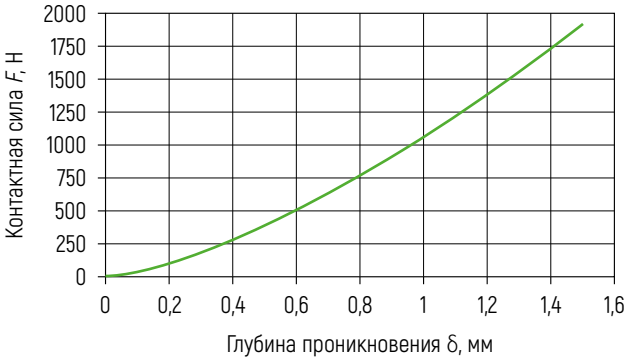
$$F_{contact} = k_n \delta^n + c_n \dot{\delta},$$

где k_n, c_n – жёсткость и демпфирование контакта;

δ – величина проникновения поверхностей;

n – степенной коэффициент, зависящий от типа материала (рисунок 4).

а)



б)

Рисунок 4 – График оценки взаимодействия между сопрягаемыми деталями:
а – распределение отклонений размеров (μ, Σ);
б – сила взаимодействия поверхностей (модель контактной механики)

Для анализа точности сборки используется статистическая модель отклонений:

$$\Delta x_i \sim N(\mu_i, \Sigma_i),$$

где μ_i – среднее значение отклонения размера;

Σ_i – ковариационная матрица, характеризующая рассеивание параметров.

Интегральная оценка точности системы:

$$E = \sum_{i=1}^{n} \omega_i \Delta x_i,$$

где ω_i – весовые коэффициенты, соответствующие важности каждого параметра.

Для динамической корректировки параметров сборки в реальном времени используется система управления с обратной связью:

$$\tau(t) = K_p(\theta_{ref} - \theta(t)) + K_d(\dot{\theta}_{ref} - \dot{\theta}(t)),$$

где K_p, K_d – матрицы пропорционально-дифференциального регулятора;

θ_{ref}, $\dot{\theta}_{ref}$ – желаемые значения обобщённых координат и скоростей (рисунок 5) [11].

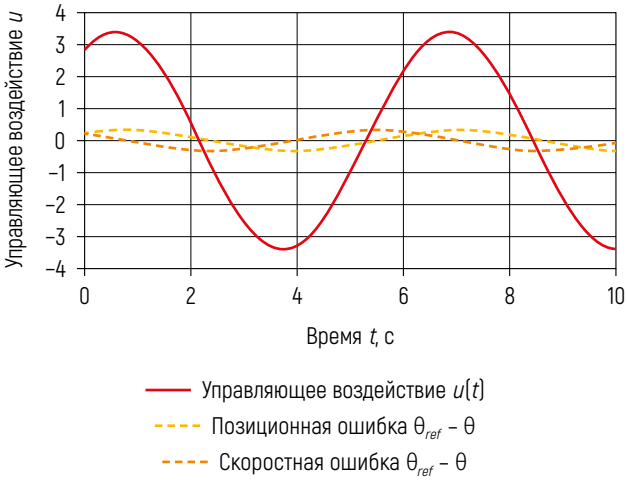


Рисунок 5 – График динамической корректировки параметров сборки (ПД-регулятор)

Заключение

Математическое описание процесса моделирования сборки КА включает в себя геометрическое, кинематическое и динамическое представление объектов, методы оптимизации, моделирование взаимодействия и системы адаптивного управления. Эти подходы позволяют строить высокоточные цифровые двойники, обеспечивающие предсказуемость, надёжность и гибкость в условиях уникальности и сложности выпускаемых изделий.

Внедрение системы управления адаптивным производством КА, основанной на использовании интеллектуальных роботизированных комплексов и технологии цифрового двойника, – сложный, многоуровневый процесс, требующий синтеза передовых технологий, компетенций, инфраструктуры и стратегического подхода. Для российской промышленности эта задача имеет как значительные перспективы, так и объективные ограничения.

Россия обладает необходимым научно-техническим заделом для создания подобных систем. Высокий уровень развития ракетно-космической отрасли, наличие опытных конструкторских бюро, исследовательских центров и университетов позволяет говорить о наличии базовой экспертизы в области автоматизации, моделирования и цифровизации производственных процессов. Некоторые предприятия уже внедряют элементы цифрового двойника, используют CAD/CAE-системы, а также осваивают применение роботизированных комплексов на отдельных этапах производства.

Кроме того, развитие отечественного программного обеспечения в сфере MES-, ERP- и PLM-систем, активизация работ по совершенствованию ИИ и машинного обучения открывают возможность формирования собственной цифровой экосистемы, не зависящей от импортозамещения на ключевых уровнях.

Несмотря на потенциал, сегодняшнее состояние большинства предприятий космической отрасли характеризуется высокой степенью морального устаревания оборудования, недостаточной цифровой зрелостью и фрагментированностью информационных систем. Интеграция интеллектуальных роботизированных комплексов и цифровых двойников требует глубокой модернизации как физического, так и информационного уровня, что связано с небольшими инвестициями, изменением корпоративной культуры и переподготовкой персонала.

Ещё одной проблемой является отсутствие единых стандартов и протоколов взаимодействия между различными системами (MES, ERP, PLM), что затрудняет формирование сквозной цифровой среды. Кроме того, в ряде случаев наблюдается сопротивление внедрению новых решений со стороны руководства и технических специалистов, привыкших к традиционным методам работы.

Создание адаптивной системы управления – капиталоёмкий проект, требующий долгосрочных инвестиций. В условиях ограниченного бюджетного финансирования и низкой рентабельности космической отрасли вопрос экономической целесообразности становится особенно острым. Однако с учётом необходимости повышения конкурентоспособности российских космических продуктов на мировом рынке, а также перехода к производству малых спутников, многоразовых систем и перспективных орбитальных комплексов (в том числе в рамках реализации инновационной программы uSpace) данные инвестиции могут быть оправданы в стратегическом плане. Государственные программы поддержки цифровизации промышленности (в частности, «Цифровая экономика», инициативы по развитию ИИ и робототехники) могут сыграть ключевую роль в обеспечении финансовой основы для внедрения рассмотренных технологий в производство.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищённых систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Список основных источников

1. *Brown, F.T. Bond-Graph Based Simulation of Thermodynamic Models / F.T. Brown // Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 2010. – Vol. 132 (6). – 064501-1.*
2. *Андиева, Е.Ю. Цифровая экономика будущего, индустрия 4.0 / Е.Ю. Андиева, В.Д. Фильчакова // Прикладная математика и фундаментальная информатика. – 2016. – № 3. – С. 214–218.*
3. *Fault Management Guiding Principles / M.E. Newhouse, K.H. Friberg, L. Fesq, B. Barley // AIAA InfoTech@Aerospace, St. Louis, 30 Mar. 2011 / American Institute of Aeronautics and Astronautics. – URL: https://dataverse.jpl.nasa.gov/dataset.xhtml?persistentId=hdl:2014/42059 (date of access: 20.05.2025).*
4. *Юницкий, А.Э. Программа «ЭкоМир» / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 24–77.*
5. *Юницкий, А.Э. Особенности проектирования жилого космического кластера «ЭкоКосмоДом» – миссия, цели, назначение / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 51–57.*
6. *Юницкий, А.Э. Мегапроекты индустриализации космоса: ракета, космический лифт, StarTram, общепланетарное транспортное средство / А.Э Юницкий, И.И. Надеев // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 65–75.*
7. *Gad, O. Bond Graph Modeling of a Two-Stage Pressure Relief Valve / O. Gad // Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 2013. – Vol. 135, No. 4. – 041001.*
8. *Автоматизированное построение математических моделей систем, заданных эквивалентными схемами / В.В Бодров, Н.В. Плотникова, М.Н. Устюгов, З.А. Фельк // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2006. – Вып. 4, № 14. – С. 53–58.*
9. *Асанов, Р.Э. Разработка методов технической подготовки автоматизированных систем производства конкурентоспособных мехатронных модулей: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Асанов Руслан Энверович; Моск. гос. технол. ун-т «Станкин». – М., 2015. – 167 л.*
10. *Асанов, М.О. Дискретная математика: графы, матроиды, алгоритмы: учеб. пособие / М.О. Асанов, В.А. Баранский, В.В. Расин. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 288 с.*
11. *Nenashev, V.A. Fusion Radar and Optical Information in Multi-Position On-Board Location Systems / V.A. Nenashev, A.P. Shepeta, A.F. Kryachko // 2020 Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2020), Saint Petersburg, 1–5 Jun. 2020 / Institute of Electrical and Electronics Engineers. – Piscataway, 2020. – P. 424–428.*

УДК 629.7+004.9

Нейросетевой протокол самовосстанавливающихся навигационных данных для автономных космических аппаратов

М.А. Артёмова

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

Представлен прототип нейросетевого протокола восстановления навигационных данных спутников, функционирующих в околоземном пространстве. Актуальность темы обусловлена уязвимостью спутниковых навигационных систем к пропускам, шумам и сдвигам, возникающим под воздействием факторов космической среды. Цель исследования – с помощью глубоких нейросетевых моделей разработать прототип интеллектуальной системы восстановления навигационных данных, которая будет способна частично компенсировать потери информации и адаптироваться к известным видам помех, что повысит устойчивость навигации в ближнем космосе.

Проведена полная реконструкция координат спутников GPS на основе эфемеридных RINEX-данных в условиях искусственно созданных повреждений. Для решения задачи использована архитектура Transformer Encoder с позиционным кодированием, механизмом внимания и маскированием пропусков. Получены высокие значения метрик точности, подтверждающие преимущество предложенной модели по сравнению с традиционными подходами за счёт восстановления всей координатной последовательности, включая участки с зашумлёнными и искажёнными данными.

Научная новизна заключается в совмещении контекстного восстановления, маски наличия данных и полной реконструкции зашумлённых координат, а также в применении архитектуры, масштабируемой под многомерные и многоспутниковые данные. Предложенный протокол может быть использован в составе распределённых навигационных систем перспективных космических миссий, в том числе на космическом индустриальном ожерелье «Орбита», а также в системах управления общепланетарного транспортного средства общей протяжённостью 40 076 км, состоящего из отдельных коротких элементов и блоков изменяющейся длины в процессе выхода на орбиту (системы магнитного подвешивания, линейные электродвигатели и др.).

Ключевые слова:
автономные космические аппараты, ближний космос, восстановление навигационных данных, космическое индустриальное ожерелье «Орбита» (КИО «Орбита»), нейросетевая модель, Transformer Encoder.

UDC 629.7+004.9

Neural Network Protocol for Self-Recovering Navigation Data for Autonomous Spacecraft

M. Artemova

Moscow Aviation Institute
(National Research University),
Moscow, Russia

A prototype of a neural network protocol for recovery of satellite navigation data operating in near-Earth space is presented. The relevance of the topic is determined by the vulnerability of satellite navigation systems to data gaps, noise, and biases induced by space-environment effects. The aim of the study is to develop, using deep neural network models, a prototype intelligent system for reconstruction of navigation data capable of partially compensating for information losses and adapting to known types of interference, thereby enhancing the resilience of navigation in near-Earth space.

A complete reconstruction of GPS satellite coordinates was performed based on RINEX ephemeris data under artificially induced corruptions. To address the problem, a Transformer Encoder architecture with positional encoding, an attention mechanism, and masking of missing entries was employed. High accuracy metrics were obtained, confirming the advantage of the proposed model over traditional approaches due to its ability to restore entire coordinate sequences, including segments with noisy and distorted data.

The scientific novelty lies in the combination of context-aware recovery, explicit masking of data presence, and full reconstruction of corrupted coordinates, as well as in the application of an architecture that is scalable to multidimensional and multi-satellite datasets. The proposed protocol can be incorporated into distributed navigation systems for advanced space missions – including the Industrial Space Necklace "Orbit"– and into control systems for a General Planetary Vehicle of total length 40,076 km, which is composed of individual short elements and variable-length blocks during orbital deployment (magnetic levitation systems, linear electric motors, etc.).

Keywords:
autonomous spacecraft,
Industrial Space Necklace "Orbit" (ISN "Orbit"),
navigation data recovery,
near-Earth space,
neural network model,
Transformer Encoder.

Введение

В последние десятилетия наблюдается значительный рост интереса к автономным космическим системам, что влечёт за собой необходимость применения высоконадёжных навигационных протоколов для выполнения сложных миссий в ближнем космосе [1]. Операции здесь сопряжены с множеством помех, таких как солнечные вспышки, радиационные выбросы и электромагнитные возмущения, которые могут вызывать потерю или искажение навигационных данных, нарушая работу спутников и системы управления траекторией.

Современные подходы, основанные на традиционных методах фильтрации и интерполяции данных, не всегда справляются с компенсацией подобных искажений, что препятствует функционированию автономных систем в реальных условиях космоса. В отличие от этих методов нейросетевые технологии эффективно выявляют сложные закономерности в данных и восстанавливают не только пропущенные, но и искажённые участки навигационных сигналов. Тем самым открываются новые возможности для применения искусственного интеллекта в области космической навигации [2, 3].

В связи с вышеизложенным настоящее исследование направлено на создание нейросетевого протокола восстановления навигационных данных для автономных космических аппаратов, которые находятся в условиях ограниченной наблюдаемости в ближнем космосе. Основная задача – разработка системы, способной эффективно восстанавливать данные, адаптируясь к различным типам помех.

Особенности и новизна предлагаемого проекта:

- моделирование помех, характерных для космической среды, таких как пропуски, гауссовский шум и систематические сдвиги;
- использование модели Transformer Encoder с параллельным вниманием для учёта длинных зависимостей в данных;
- введение бинарной маски для различения достоверных и повреждённых данных в процессе восстановления;
- обучение модели на задаче полного восстановления, включая компенсацию зашумлённых и смещённых координат.

Целью работы является построение прототипа системы для восстановления данных, которая сможет адаптироваться к различным условиям и функционировать в составе автономной космической инфраструктуры, в том числе в спутниковых группировках, на лунных станциях и межорбитальных платформах. Кроме того, такая система применима для индустриализации ближнего космоса, подразумевающей использование общепланетарного транспортного средства и космического индустриального ожерелья «Орбита» [4, 5].

Настоящее исследование направлено не только на достижение технического результата, но и на совершенствование подходов к адаптивной реконструкции данных при ограниченной наблюдаемости и в нестабильной среде, что представляет интерес как для прикладной космической навигации, так и для общей теории восстановления временных рядов в присутствии множественных искажений. Дальнейшее развитие предложенной технологии может быть ориентировано на обеспечение надёжной навигации в проектах по индустриализации ближнего космоса, включая автономные биоэнергетические кластеры и управляемые экосистемы, как это предусмотрено программой «ЭкоМир» [6].

Теоретические основы восстановления навигационных данных в ближнем космосе

Навигационные системы и источники помех

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), такие как ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), Galileo (ЕС) и BeiDou (Китай), обеспечивают высокоточную навигацию на земной поверхности и в ближнем космосе. Принцип их работы основан на измерении времени распространения радиосигналов от нескольких спутников до приёмного устройства, что позволяет вычислить его текущие координаты методом триангуляции.

Для навигации в ближнем космосе, особенно за пределами плотной атмосферы (на высоте свыше 1000 км), использование традиционных методов ГНСС имеет ряд ограничений:

- снижение мощности принимаемого сигнала из-за направленного вещания антенн ГНСС на Землю;
- невозможность одновременного приёма навигационных сигналов от достаточного количества спутников (менее четырёх);
- высокая чувствительность к потерям фазового и псевдодальномерного сигнала при быстром движении аппарата и изменении геометрии созвездия.

Эти ограничения требуют применения высокоточных инерциальных систем и альтернативных источников навигации (например, радиоинтерферометрических методов),

а также разработки адаптивных методов восстановления данных, что особенно актуально при ухудшении условий навигационного наблюдения.

В ближнем космосе (до 20 000 км от поверхности Земли) навигационные системы подвергаются множественным дестабилизирующим воздействиям, вызывающим утрату или искажение навигационной информации (таблица 1).

Таблица 1 – Основные виды помех в ближнем космосе

Виды воздействий	Источники	Последствия для навигационных данных
Радиационные всплески	Солнечные вспышки, космическое излучение	Повреждения электроники, срывы сигналов, появление артефактов
Электромагнитные возмущения	Ионосферные бури, взаимодействие с магнитосферой	Задержки сигналов, фазовые сдвиги, потери точности
Механические вибрации и удары	Манёвры космических аппаратов, коррекция орбиты	Ошибки в инерциальных измерениях, спорадические сбои
Температурные нагрузки	Попеременное освещение и затенение	Дрейфы аппаратных сенсоров, искажения калибровки
Потери связи	Уход из зоны покрытия, сбои антенн	Разрывы в данных, невозможность синхронизации

Особое внимание в настоящем исследовании уделяется трём видам искажений, которые можно формализовать и ввести в обучающую выборку модели:

- случайные пропуски – возникают при кратковременных сбоях, могут быть хаотичными по времени и продолжительности;
- групповые (блочные) пропуски – характерны для периодов полной потери связи или перегрузки каналов телеметрии;
- искажения сдвига и шума – вызваны фазовыми скачками, температурными дрейфами, ложными измерениями.

Для условий ближнего космоса свойственны низкая наблюдаемость и частичная доступность данных [7]. Это делает традиционные методы их восстановления (интерполяция, сплайн, фильтр Калмана) малоэффективными в случаях, когда искажения выходят за рамки нормального отклонения.

Кроме того, систематические сдвиги координат могут привести к накопленным ошибкам в динамике полёта, особенно при орбитальной коррекции. Для их компенсации требуется модель, способная различать нормальные данные от зашумлённых и использовать глобальный контекст последовательности, как это реализуется в архитектуре Transformer Encoder, применённой в настоящей работе.

Методы восстановления навигационных данных

Восстановление навигационных данных относится к классу задач аппроксимации и регенерации временных рядов при наличии повреждённых или недостоверных значений. В контексте спутниковой навигации такие искажения возникают вследствие пропусков (NaN), шумов, фазовых сдвигов или аномалий, вызванных внешними возмущениями. Метод восстановления должен учитывать сохранение непрерывности и гладкости траектории, минимизацию глобальной ошибки положения и физическую правдоподобность траектории спутника.

Существующие подходы можно разделить на две основные группы: классические (интерполяционные и фильтрационные, включая вероятностные методы) и обучаемые методы (нейросетевые и статистические модели).

Интерполяционные методы. Линейная интерполяция – один из наиболее простых методов. Восстановление происходит путём линейного приближения по двум соседним известным точкам. Эффективен для коротких пропусков, но не учитывает форму траектории и не применим при наличии шумов или длинных разрывов.

Кубический сплайн – метод аппроксимации с использованием полиномов третьей степени для достижения гладкости первой и второй производных. Даёт более реалистичную траекторию по сравнению с линейной интерполяцией, но чувствителен к шумам и выбросам.

Фильтрационные и вероятностные методы. Фильтр Калмана – рекурсивный алгоритм оценки состояния системы на основе зашумлённых измерений, который обеспечивает устойчивость к шуму и может работать в реальном времени. Эффективность фильтра в существенной степени зависит от знания модели движения и параметров шума, кроме того, он плохо справляется с крупными пропусками данных [8].

Экспоненциальное сглаживание – метод, при котором каждое новое значение вычисляется как усреднённое с предыдущим. Оптимален для подавления мелкого шума,

но не восстанавливает структуру траектории и не отражает её динамику.

Байесовские и вероятностные подходы основаны на апостериорной вероятности и вероятностных моделях, позволяют учитывать неопределённость и строить интервальные оценки.

В рамках настоящей работы байесовские методы не анализировались ввиду их высокой вычислительной сложности и слабой применимости в условиях реального времени, однако они включены в теоретический обзор как потенциально перспективное направление для дальнейших исследований.

Таким образом, классические способы восстановления навигационных данных обладают важными преимуществами, но также имеют серьёзные ограничения. Ни один из рассмотренных методов не может одновременно компенсировать пропуски, шумы и сдвиги при сохранении физической достоверности восстановленной траектории, что предопределяет переход к нейросетевым методам.

Глубокие нейросетевые модели. Представляют собой класс обучаемых алгоритмов, автоматически извлекающих иерархические признаки из входных данных. Их эффективность в задачах восстановления временных рядов обусловлена способностью анализировать нелинейные зависимости, учитывать широкий временной контекст и адаптироваться к свойствам конкретных данных [9, 10].

MLP (многослойный персептрон) – простая полносвязная сеть, которая хорошо функционирует на стационарных признаках, но не обрабатывает временные зависимости и не хранит информацию о предыдущих состояниях.

RNN, GRU, LSTM – рекуррентные сети, сохраняющие внутреннее состояние между временными шагами. Механизмы GRU и LSTM уменьшают эффект исчезающих градиентов и лучше учитывают долгосрочные зависимости, однако вычисления остаются по своей природе последовательными, что ограничивает масштабируемость на длинных фрагментах данных.

CNN (свёрточные сети) применяют свёртки для выделения локальных закономерностей, обеспечивают высокую устойчивость к шумам и параллелизм вычислений, но не улавливают дальние зависимости во временном ряду.

Transformer – архитектура, основанная на механизме самовнимания [11], позволяющем каждому элементу учитывать контекст всей последовательности. Даёт лучший охват зависимостей, легко масштабируется и хорошо работает с пропусками и шумами. Главный недостаток – высокая вычислительная нагрузка.

Кроме того, в рамках исследования изучалась архитектура генеративно-состязательной сети (GAN), сочетающая Transformer Encoder в роли генератора и GRU в роли дискриминатора. Такой подход предполагал объединение глобального охвата и вероятностного обучения, однако на практике архитектура показала нестабильность обучения, чувствительность к гиперпараметрам и снижение качества восстановления. В результате предпочтение отдано «чистому» Transformer Encoder, как более устойчивой и интерпретируемой архитектуре.

Требования к моделям восстановления

Эффективность восстановления навигационных координат в задачах спутникового позиционирования определяется не только численными метриками, но и их интерпретацией в контексте практического применения. Модель, демонстрирующая низкие ошибки, может оказаться неустойчивой к редким искажённым участкам, в то время как более грубая по средним метрикам модель способна надёжно восстанавливать физически правдоподобную траекторию. В связи с этим необходимо формализовать требования к точности и устойчивости используемых методов.

Точность восстановления координат. Под точностью в данном контексте понимается среднее приближение восстановленных координат к истинным значениям по всей траектории. Она количественно оценивается следующими метриками:

1) корень среднеквадратичной ошибки (RMSE):

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\Sigma_{i=1}^{N}(\hat{y}_i - y_i)^2}, \qquad (1)$$

где $\hat{y}_i$ – восстановленная координата;

y_i – истинное значение;

N – общее количество точек.

RMSE показывает, насколько (в среднем) существенно отклоняются восстановленные значения от истинных, при этом вклад больших ошибок усиливается за счёт возведения в квадрат;

2) средняя абсолютная ошибка (MAE):

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{N}\Sigma_{i=1}^{N}|\hat{y}_i - y_i|. \qquad (2)$$

MAE отражает среднюю величину отклонения восстановленных координат от истинных без усиления влияния крупных ошибок (в отличие от RMSE). Это интуитивно понятная и устойчивая к выбросам метрика;

3) медианная абсолютная ошибка (MedAE):

$$\text{MedAE} = \text{median}\,(|\hat{y}_i - y_i|). \qquad (3)$$

MedAE показывает типичную (центральную) ошибку в данных, полностью игнорируя экстремальные значения. Эта метрика особенно полезна в случае наличия выбросов или асимметричного распределения ошибок;

4) средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE):

$$\text{MAPE} = \frac{100\,\%}{N} \Sigma_{i=1}^{2} \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i + \varepsilon} \right|, \qquad (4)$$

где $\varepsilon > 0$ для предотвращения деления на ноль при $y_i = 0$.

MAPE выражает среднюю ошибку в относительных процентах и позволяет сравнивать качество восстановления при разных масштабах координат, однако требует осторожности при малых или нулевых y_i;

5) коэффициент детерминации R^2:

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma(\hat{y}_i - y_i)^2}{\Sigma(y_i - \bar{y}_i)^2}, \qquad (5)$$

где $\bar{y}_i$ – среднее значение истинных координат.

R^2 показывает, насколько хорошо модель объясняет вариацию данных:

- $R^2 = 1$ – идеальное совпадение;
- $R^2 = 0$ – модель не лучше среднего значения;
- $R^2 < 0$ – модель хуже, чем среднее значение.

Устойчивость моделей восстановления. Устойчивость представляет собой способность модели сохранять корректность восстановления при наличии аномалий во входных данных. Она включает:

- защиту от выбросов – отсутствие резких скачков координат при потере части информации;
- шумоустойчивость – корректную реконструкцию при наличии смещений и шумов;
- обобщаемость – возможность восстанавливать координаты новых спутников, не встречавшихся при обучении.

Высокая точность (низкие RMSE, MAE) не всегда означает надёжность: модель может быть чувствительна к нештатным данным. Устойчивые модели, напротив, адекватно восстанавливают критические участки, хотя имеют ошибки выше средних. Следовательно, важно учитывать глобальную точность, локальную стабильность и способность к восстановлению аномалий. Особенно это касается задач космической навигации, где ошибка на коротком интервале может привести к отказу миссии.

Практическая реализация протокола восстановления навигационных данных

Постановка задачи

Целью практической части исследования является реализация протокола восстановления навигационной информации спутников в условиях пропусков, шумов и сдвигов траекторий. Задача ставится как обратная: по искажённым значениям координат строится модель, воспроизводящая исходную траекторию.

Первоначальные измерения берутся в формате RINEX и преобразуются в трёхкомпонентный массив координат в глобальной системе ECEF. Затем в данные целенаправленно вносятся повреждения, имитирующие космические помехи. Конечная цель – обучение нейросетевой модели на искажённых последовательностях для полного восстановления исходной орбиты.

Подготовка данных

Навигационные координаты вычислялись на основе эфемерид навигационных сообщений в формате RINEX с применением разработанного программного модуля. Для анализа использовались 50 RINEX-файлов, полученных из архива МСС (ГЛОНАСС/ИАЦ). Расчёты выполнялись для спутников GPS G01–G04 на интервале в пять суток с шагом 60 с.

Итоговые координаты приведены в системе ECEF. Общий объём исходных данных составил 288 000 строк, каждая из них соответствует одному временному отсчёту одного спутника и содержит идентификатор файла, номер спутника, время и координаты *X*, *Y*, *Z*.

На рисунках 1–3 представлены «идеальные» траектории координат *X*, *Y* и *Z* для четырёх спутников.

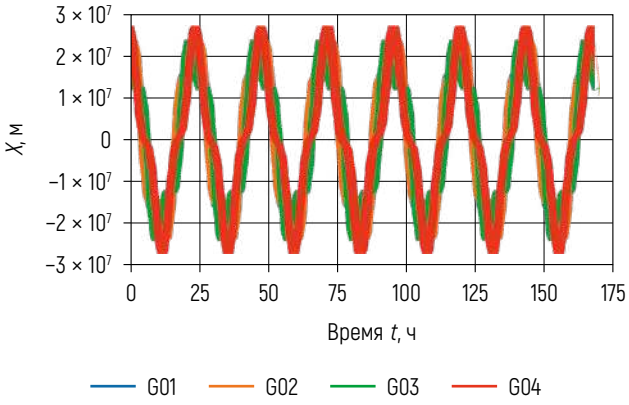


Рисунок 1 – Эволюция координаты *X* во времени для спутников G01–G04

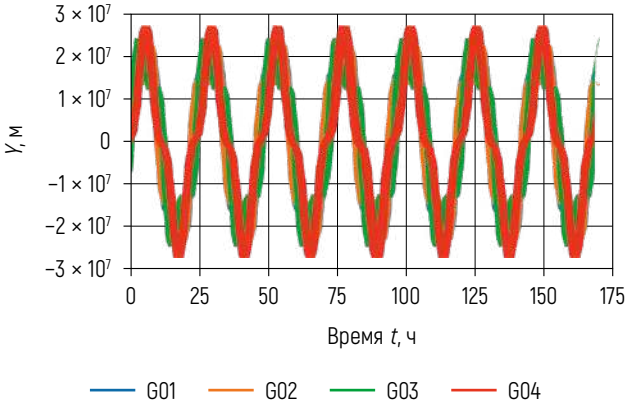


Рисунок 2 – Эволюция координаты *Y* во времени для спутников G01–G04

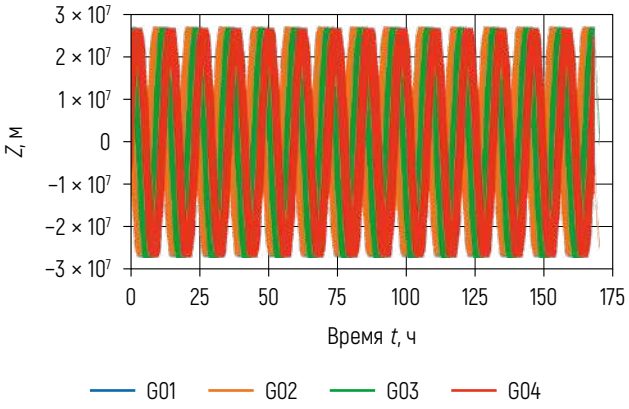


Рисунок 3 – Эволюция координаты *Z* во времени для спутников G01–G04

Для моделирования повреждений реализован модуль искусственного искажения координат, включающий:

- случайные пропуски – 15 % координатных точек заменяются на NaN;
- блочные пропуски – 30 блоков по 60 точек с полным отсутствием данных;
- локальные шумы – аддитивные искажения с нормальным распределением (σ = 5000 м);
- систематический сдвиг – введён на одном интервале *Z*-координат на величину 10 км.

На рисунке 4 показаны графики координат *X*(*t*), *Y*(*t*), *Z*(*t*) до и после повреждений.

На рисунке 5 представлены разности между исходными и повреждёнными координатами, отражающие форму и амплитуду добавленных шумов и сдвигов.

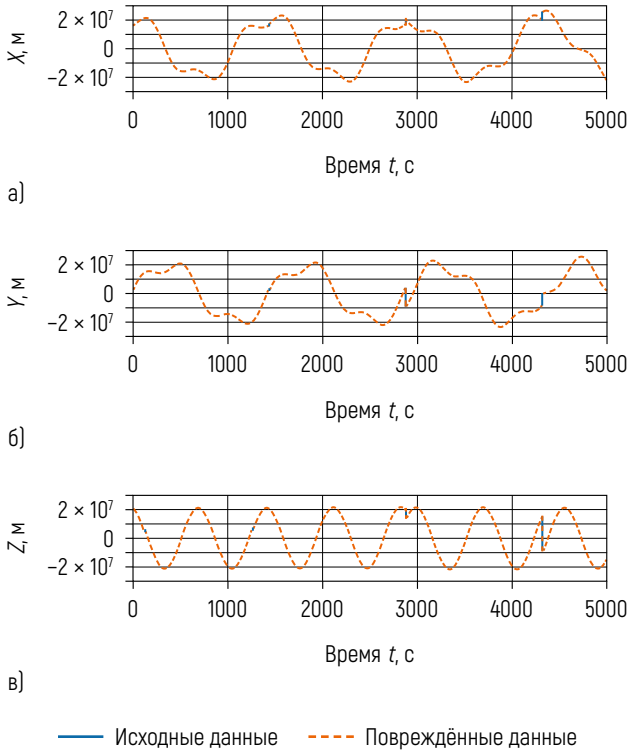


Рисунок 4 – Сравнение исходных и повреждённых координат для одного спутника: а – *X*(*t*); б – *Y*(*t*); в – *Z*(*t*)

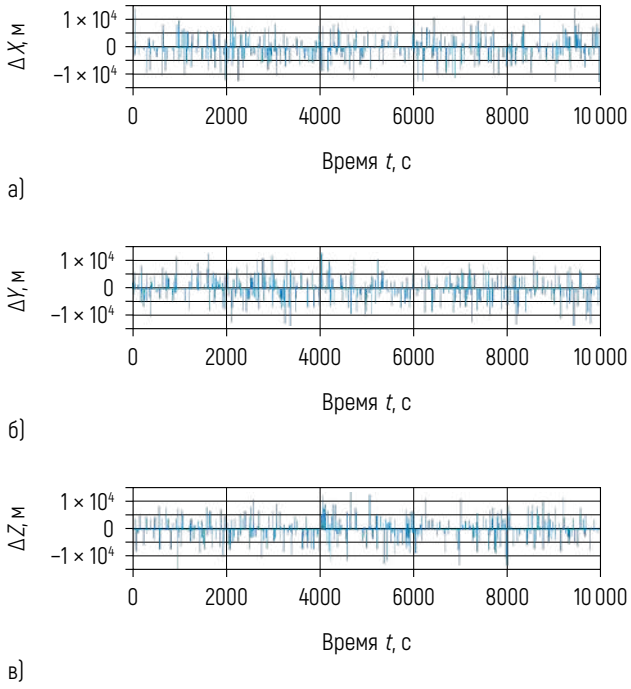


Рисунок 5 – Графики координатных сдвигов на первых 10 000 точках: а – Δ*X*; б – Δ*Y*; в – Δ*Z*

Подготовленные данные применялись для обучения модели восстановления координат.

Архитектура реализованной нейросетевой модели

В рамках настоящего исследования реализована нейросетевая модель, предназначенная для восстановления координат космических аппаратов в условиях частичной утраты и искажения навигационной информации. В основе решения лежит архитектура Transformer Encoder, использующая параллельные блоки внимания и способная эффективно обрабатывать последовательности произвольной длины с учётом глобального контекста.

Структура входных данных. На вход модели подаётся тензор размерности (batch_size, SEQ_LEN, 2 × FEATURE_DIM), где:

- SEQ_LEN – длина последовательности (в данной реализации 100 временных отсчётов);
- FEATURE_DIM = 3 – количество пространственных координат: *X*, *Y*, *Z*;
- первый канал – стандартизованные координаты;
- второй канал – бинарная маска наличия данных (0 – повреждённая точка, 1 – исходная).

Каждый входной вектор содержит шесть признаков: [*X*, *Y*, *Z*, *mX*, *mY*, *mZ*].

Компоненты архитектуры. Модель состоит из компонентов, представленных в таблице 2.

Функция потерь и обучение. Функция потерь – среднеквадратичная ошибка (MSE) – выражается соотношением:

$$L = \mathrm{MSE} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\|\hat{y}_i - y_i\|^2. \quad (7)$$

Оптимизатор – Adam. Обучение проводилось в течение 300 эпох с размером батча 64. Валидация выполнялась на 10 % отложенной части выборки. Отдельный независимый test-набор не выделялся с целью сохранения достаточного объёма обучающей выборки при ограниченном массиве наблюдений. Полученные метрики интерпретировались как оценка обобщающей способности на отложенных данных, поскольку исследование ориентировано на проверку устойчивости модели к искусственно созданным деградациям и сравнительный анализ в вычислительной постановке.

Анализ результатов восстановления навигационных данных нейросетевой моделью. Разработанная модель продемонстрировала высокую точность восстановления координат спутников по всем компонентам. Визуально восстановленные траектории почти полностью совпадали с истинными, включая проблемные участки.

По численным метрикам модель показала:

- RMSE = 255 469,22 м – умеренная ошибка на всей выборке;
- MAE = 32 123,85 м – высокая средняя точность;
- MedAE = 0,33 м – половина точек восстановлена с ошибкой менее метра;

Таблица 2 – Структура модели и параметры слоёв

Тип слоя	Параметры	Назначение/описание
Входной слой	Input(shape=(100, 6))	Подаёт на вход 100 векторов размерности 6: координаты (3) + маска (3)
Полносвязный слой (Dense)	Dense(64)	Преобразует вход в скрытое пространство размерности *d*_model = 64
Positional Encoding*	PositionalEncoding(100, 64)	Добавляет позиционную информацию к каждому элементу последовательности
Transformer-блок 1	MultiHeadAttention(num_head=4, key_dim=16) → → LayerNormalization Dense(256, relu) → Dense(64) → LayerNormalization	Первый блок трансформера: внимание + FFN + нормализация
Transformer-блок 2		Второй блок трансформера
Transformer-блок 3		Третий блок трансформера
Выходной слой (Dense)	Dense(3)	Восстанавливает координаты *X*, *Y*, *Z*

* Позиционное кодирование добавляет информацию о порядке временных шагов посредством фиксированных синусоидальных функций:

$$\begin{cases} PE_{(pos,\,2i)} = \sin\left(pos/10\,000^{(2i/d_\mathrm{model})}\right) \\ PE_{(pos,\,2i)} = \cos\left(pos/10\,000^{(2i/d_\mathrm{model})}\right) \end{cases}. \quad (6)$$

- MAPE = 0,98 % – низкое относительное отклонение;
- R^2 = 0,9997 – почти полное совпадение с исходными данными.

Такой результат достигается за счёт возможности нейросети учитывать глобальный временной контекст, отличать повреждённые данные от достоверных с помощью маски и обучаться на задаче полной реконструкции, включая зашумлённые и смещённые участки.

Несмотря на отсутствие явно «нулевых» ошибок, модель демонстрирует высокую обобщающую способность и превосходит классические методы по степени участия в восстановлении всей траектории, а не только пропущенных точек.

Визуализация координат $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$ на рисунке 6 подтверждает точность даже вблизи участков с искажениями; отклонения минимальны.

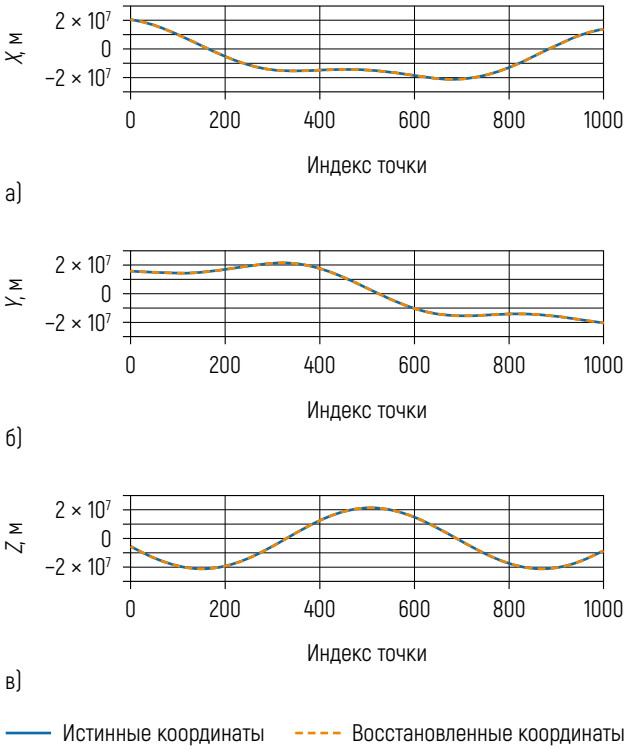


Рисунок 6 – Сравнение истинных и восстановленных координат спутника на первых 1000 точках валидационной выборки: а – $X(t)$; б – $Y(t)$; в – $Z(t)$

График обучения (рисунок 7) показывает быстрое снижение ошибки и стабильность на валидации, что свидетельствует об отсутствии переобучения и хорошей обобщающей способности.

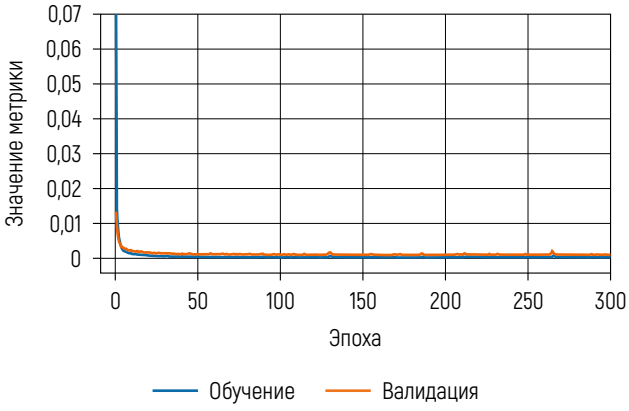


Рисунок 7 – Динамика MSE на обучающей и валидационной выборках при обучении нейросетевой модели

Таким образом, разработанная модель является эффективным инструментом для реконструкции навигационных данных при внешних помехах и потерях информации и может быть рекомендована для задач автономной спутниковой навигации в нестабильной среде ближнего космоса.

Альтернативные архитектуры и отказ от GAN

В рамках исследования реализован протокол восстановления координат спутников с помощью архитектуры GAN на базе Transformer Encoder. Генератор включает позиционное кодирование, механизм многогранного внимания (multi-head attention) и блоки прямой передачи с ReLU. Размерность представлений – 64, применяется регуляризация через dropout (p = 0,1). Входные данные – последовательности длиной 100 отсчётов с повреждёнными координатами и маской пропусков, восстановление осуществляется только по недостающим точкам. Дискриминатор использует однонаправленный слой GRU для отличия истинных и сгенерированных данных.

Обучение проводилось по составной функции потерь, включающей MSE и бинарную кросс-энтропию (BCE) от отклика дискриминатора:

$$L_{GAN} = L_{MSE} + 0{,}1L_{BCE}. \quad (8)$$

На 23-й эпохе зафиксированы значения: RMSE = = 4,3 млн м, MAE = 1,35 млн м, MAPE = 38 %, медианная ошибка – 0,33 м, максимальная – 41,9 млн м, среднее смещение ≈ ≈ 258 км. Модель продемонстрировала точность в основной массе выборки, однако сохранила характерные для GAN редкие, но критические выбросы. Достигнутые показатели точности были недостаточными для удовлетворения

технических требований, что свидетельствует о непригодности архитектуры для целевого применения.

На рисунке 8 представлена динамика метрик при обучении базовой архитектуры GAN.

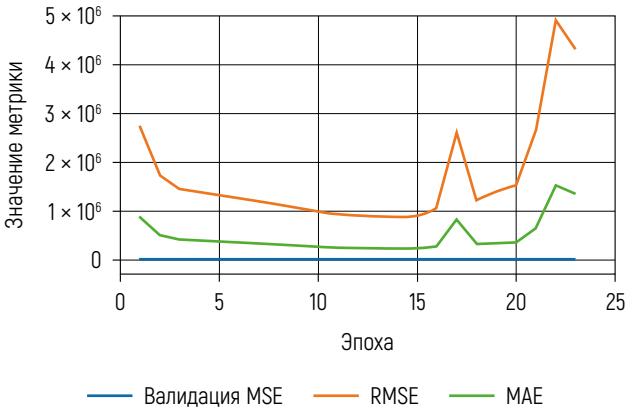


Рисунок 8 – Изменение метрик по эпохам при обучении базовой архитектуры GAN (количество нейронов – 64; длина входной последовательности – 100 отсчётов)

В следующем эксперименте протестирована расширенная версия архитектуры с четырьмя Transformer-блоками (128 нейронов) и увеличенной длиной входной последовательности до 200 отсчётов. Каждый блок включает позиционное кодирование, самовнимание и layer normalization. Дискриминатор использует двунаправленную GRU. Обучение проводилось с составной функцией потерь (8). Стабилизация реализована через регуляризацию, batch shuffling и раннюю остановку по валидационной ошибке (patience = 30).

Модель продемонстрировала удовлетворительные результаты на 40-й эпохе: RMSE ≈ 1 млн м, MAE ≈ 200 000 м, MAPE < 10 %, однако после 50-й эпохи началось резкое ухудшение метрик и к 70-й эпохе значения составили: RMSE = = 5,8 млн м, MAE = 1,79 млн м, MAPE = 25 %. Поведение кривых указывает на фазу переобучения и потерю устойчивости генератора, характерную для GAN с доминирующей мощностью генератора над дискриминатором. Модель начинает синтезировать некорректные координаты, не соответствующие физическим траекториям. Ни ослабление генератора, ни увеличение размерности, длины входа и размера батча не решили проблему, а сделали обучение менее чувствительным к локальным аномалиям.

На рисунке 9 представлена динамика метрик при обучении расширенной архитектуры GAN.

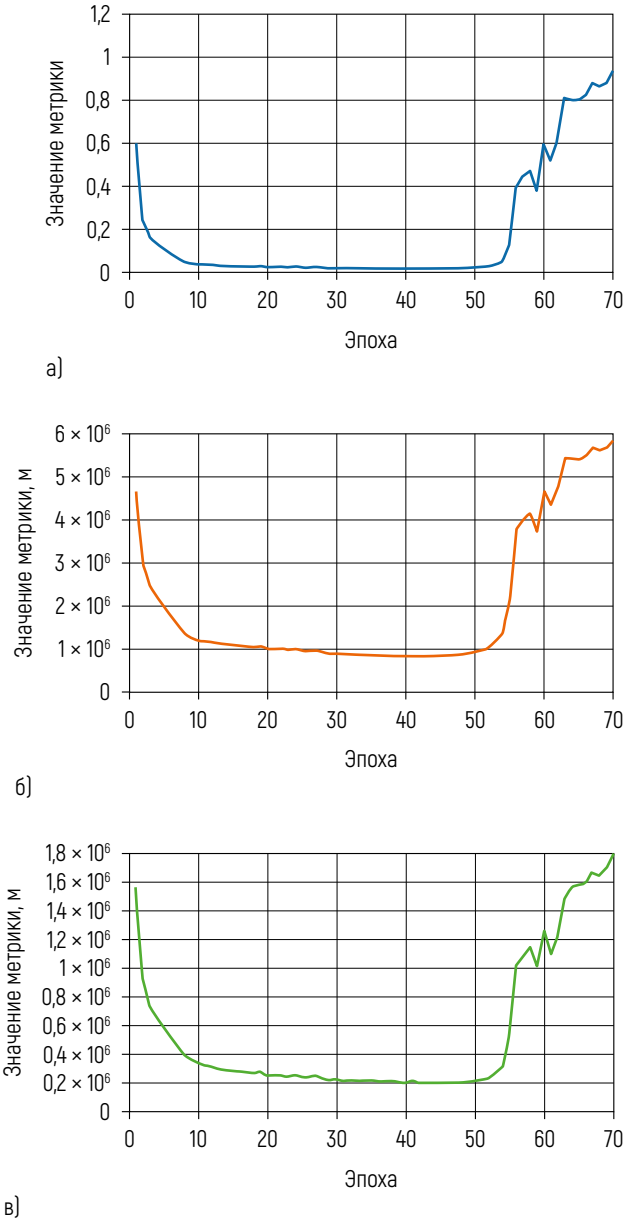


Рисунок 9 – Изменение метрик по эпохам при обучении расширенной архитектуры GAN (количество нейронов – 128; длина входной последовательности – 200 отсчётов): а – валидация MSE; б – RMSE; в – MAE

В рамках работы протестирован и проанализирован ряд архитектурных и обучающих модификаций:

- добавление dropout и batch normalization внутри блоков внимания (на основе этих слоёв обучение было частично стабилизировано, но снижало способность модели к обобщению);

• использование свёрточных слоёв (Conv1D) на входе (не дало прироста точности из-за слабой пространственной структуры сигнала);

• применение искусственных шумов и сдвигов координат (повысило реализм обучающих данных, но не устранило выбросы);

• сокращение числа блоков внимания и уменьшение числа нейронов (повышали устойчивость, но снижали точность восстановления);

• изменение коэффициента обучения, размера батча, выбор различных оптимизаторов (Adam, RMSProp) (не дали устойчивого улучшения).

Несмотря на внедрение внимания, регуляризацию, расширение входа и глубины, улучшение дискриминатора и оптимизацию обучающей процедуры, архитектуры на базе GAN не обеспечили приемлемого баланса между точностью и устойчивостью.

Основная проблема всех протестированных моделей – наличие в восстановленных координатах редких, но критически больших выбросов, не поддающихся контролю через стандартные методы регуляризации. Вследствие этого ни одна из протестированных конфигураций не может быть рекомендована для практического применения в задачах точного восстановления спутниковых навигационных траекторий.

Сравнение нейросетевой модели и традиционных методов восстановления данных

Для оценки эффективности нейросетевой модели восстановления координат спутников проведён сравнительный анализ с классическими методами аппроксимации и фильтрации временных рядов. Это необходимо для демонстрации преимуществ глубокого обучения в задачах спутниковой навигации.

В качестве эталонных методов использованы линейная интерполяция, кубический сплайн, экспоненциальное сглаживание и фильтр Калмана. Каждый из них протестирован на одинаковом наборе повреждённых данных и оценён по метрикам RMSE, MAE, MedAE, MAPE и R^2.

Результаты сравнения представлены в таблице 3, а визуализация восстановленных координат – на рисунке 10.

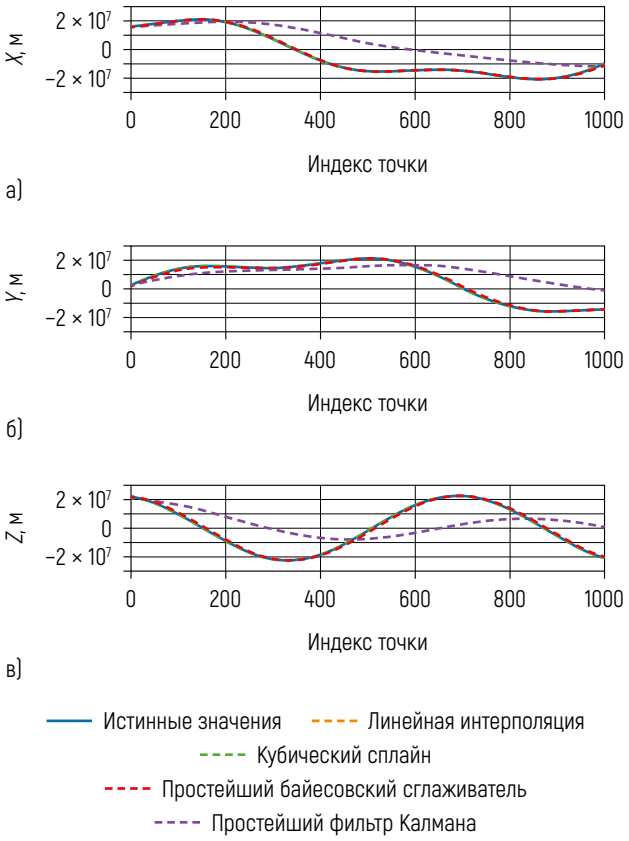


Рисунок 10 – Восстановление координат спутника классическими методами восстановления данных: а – по оси *X*; б – по оси *Y*; в – по оси *Z*

Таблица 3 – Сравнение методов восстановления навигационных данных по метрикам

Метод	Метрика				
	RMSE, м	MAE, м	MedAE, м	MAPE, %	R^2
Линейная интерполяция	89 452,38	3208,6	0	0,22	1
Кубический сплайн	93 528,98	2128,35	0	0,21	1
Простейший байесовский сглаживатель	737 001,7	456 626,8	375 760,2	35,96	0,9977
Простейший фильтр Калмана	13 411 734,07	11 920 710,71	11 993 047,87	753,25	0,9465
Нейросеть	255 469,22	32 123,85	0,33	0,98	0,9997

Классические методы показывают более низкие значения ошибок, несмотря на то что по своей природе они не восстанавливают шумы и сдвиги, а лишь заполняют пропущенные значения.

При этом нейросетевая модель, обученная специально для реконструкции траекторий при всех типах искажений, включая случайные пропуски, зашумлённые участки и систематические сдвиги, демонстрирует более высокие численные ошибки. Такое расхождение требует научного пояснения.

Во-первых, классические методы работают по локальной схеме: линейная интерполяция и сплайн заполняют исключительно точки с пропущенными значениями, не пытаясь анализировать и корректировать участки с присутствующими, но искажёнными координатами. Байесовские и скользящие фильтры оказывают сглаживающее воздействие на всю последовательность, но при этом не используют информацию о глобальной структуре траектории. Таким образом, если в данных присутствуют шумы и сдвиги, эти методы или никак их не затрагивают (в случае интерполяции), или сглаживают несущественно, не приближаясь к истинным значениям.

Во-вторых, при расчёте метрик по всей выборке искажается реальная картина эффективности методов. В массиве навигационных данных количество точек с повреждениями, как правило, невелико по сравнению с общим объёмом данных (5–15 % от траектории), что приводит к усреднению метрик по большей части неповреждённых точек. Классические методы, которые не восстанавливают участки с реальными искажениями, получают близкие к нулю значения ошибок на них, за счёт чего общая ошибка оказывается низкой, однако это принципиально снижает их прикладную ценность.

В-третьих, нейросеть в отличие от классических методов восстанавливает всю последовательность координат, включая как явно повреждённые участки, так и те, где присутствует слабое искажение. При этом даже малейшие отклонения от эталона, вызванные стремлением нейросети предсказать закономерность движения, учитываются в расчёте ошибок и увеличивают итоговые значения метрик.

Можно сделать вывод, что наблюдаемое «преимущество» классических методов определено не их реальной способностью к восстановлению координат, а спецификой поведения на выборке: такие методы в основном не модифицируют участки с неповреждёнными данными, ограничиваясь пассивной обработкой. Это позволяет им демонстрировать искусственно заниженные значения ошибок за счёт избегания вмешательства в сложные или искажённые фрагменты. В результате формируется иллюзия высокой точности, не соответствующая фактической эффективности реконструкции траектории в условиях повреждений.

Для научно корректного сравнения восстановления координат целесообразно выделять три группы оценки:

- метрики по NaN – для оценки способности к интерполяции;
- метрики по участкам с внесёнными шумами и сдвигами – для оценки устойчивости к искажениям;
- метрики по всей выборке – как ориентировочный, но не главный критерий.

Помимо численного анализа по всей тестовой выборке важным аспектом является осуществление качественной оценки восстановления на критических участках траектории, включая визуализацию и интерпретацию поведения модели. Несмотря на то что основные метрики в данном исследовании рассчитывались глобально, качественный анализ дополняет численные результаты, позволяя всесторонне изучить характер ошибок.

Таким образом, нейросетевой подход обладает несравненно большей прикладной ценностью. Имея формально высокие значения ошибок на полной выборке, он демонстрирует способность к обобщению, адаптивность к разнообразным типам искажений и значительную степень интеллектуального участия в восстановлении координат. В условиях реальных спутниковых и навигационных помех именно подобные свойства становятся критически важными для повышения надёжности навигационных систем.

Заключение

В процессе исследования разработан и реализован нейросетевой протокол самовосстановления навигационных данных для автономных космических аппаратов, функционирующих в условиях ближнего космоса. На основе анализа существующих подходов и оценки особенностей навигационного обеспечения подтверждена актуальность построения интеллектуальной системы восстановления, способной адаптироваться к различным типам искажений, включая случайные и блочные пропуски, шумы и систематические сдвиги.

В ходе выполнения проекта достигнуты следующие результаты:

- образована автоматизированная система обработки навигационных данных, извлекающая координаты из эфемеридных RINEX-файлов, на основе которой подготовлены тренировочные и тестовые наборы данных. Проведено моделирование реальных космических помех, включая 15 %

случайных пропусков, блочные пропуски, гауссовский шум и систематические сдвиги;

• осуществлено тщательное тестирование нейросетевой модели на основе Transformer Encoder, предусматривающей позиционное кодирование, механизм параллельного внимания и резидуальные связи, что обеспечивает устойчивость и точность восстановления координат. Модель продемонстрировала высокие качественные и количественные показатели (таблица 3). Полученные результаты подтверждают способность модели эффективно реконструировать координаты даже на участках с большими повреждениями;

• проанализированы и протестированы альтернативные подходы, в частности архитектуры на базе генеративно-состязательных сетей. Несмотря на использование продвинутых методов регуляризации, таких как dropout и layer normalization, GAN-архитектуры оказались недостаточно устойчивыми для практического применения ввиду критических выбросов в восстановленных данных;

• проведён подробный сравнительный анализ разработанной нейросетевой модели и традиционных методов восстановления данных (линейная интерполяция, кубический сплайн, простейший байесовский сглаживатель и простейший фильтр Калмана). У традиционных методов формально лучшие усреднённые метрики, однако их показатели предопределены игнорированием зашумлённых и сдвинутых участков. Нейросетевая модель, напротив, восстанавливает весь временной ряд и демонстрирует значительно более высокую практическую ценность при наличии реальных космических помех.

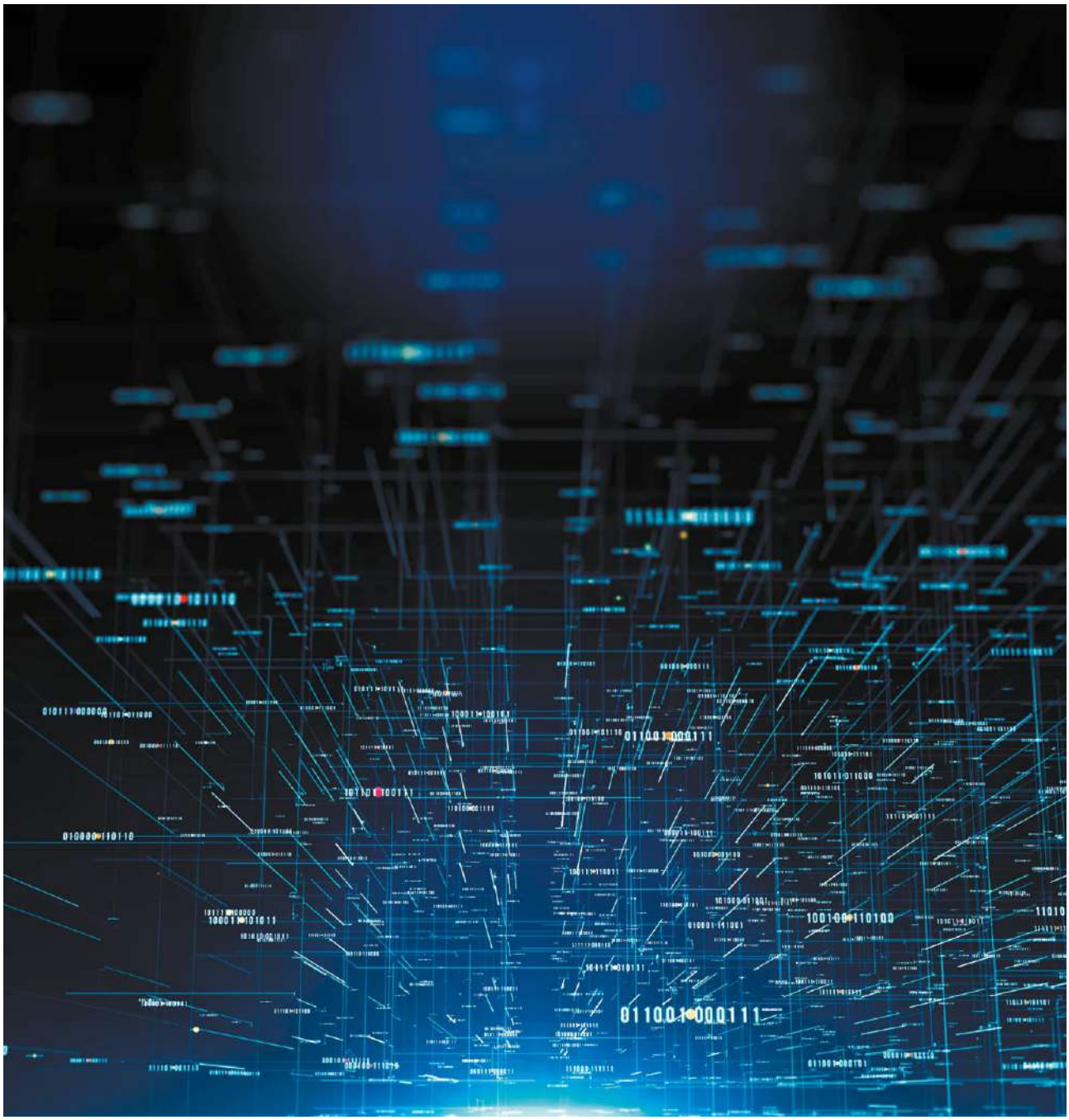
Таким образом, нейросетевая модель на основе Transformer Encoder подтвердила свою эффективность и перспективность для задач автономной спутниковой навигации. Модель обладает способностью учитывать глобальный временной контекст, отличать повреждённые данные от исходных и адаптироваться к новым условиям, что обеспечивает повышение надёжности и устойчивости навигационных систем. Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение архитектуры модели до обработки многомерных и мультиспутниковых данных, а также на её интеграцию с системами управления автономных космических аппаратов [12].

Список основных источников

1. *Тучин, Д.А. Автономное определение орбиты на борту космического аппарата / Д.А. Тучин // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2019. – № 7. – С. 1–36.*
2. *Vyas, K. NASA Is Developing an AI-Powered Navigation System for Space / K. Vyas // Interesting Engineering. – URL: https://interestingengineering.com/science/nasa-is-developing-an-ai-powered-navigation-system-for-space. – Publ. date: 27.08.2018.*
3. *Artificial Intelligence for Trusted Autonomous Satellite Operations / K. Thangavel, R. Sabatini, A. Gardi [et al.] // Progress in Aerospace Sciences. – 2024. – Vol. 144. – P. 1–36.*
4. *Юницкий, А.Э. Особенности проектирования жилого космического кластера «ЭкоКосмоДом» – миссия, цели, назначение / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 51–57.*
5. *Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы III междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 12 сент. 2020 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск: СтройМедиаПроект, 2021. – 516 с.*
6. *Юницкий, А.Э. Программа «ЭкоМир» / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 24–77.*
7. *Повышение автономности функционирования космических систем связи и навигации на основе использования информационных ГНСС-технологий / Е.В. Акимов, Д.А. Козорез, М.Н. Красильщиков, Д.М. Кружков // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2017. – № 8 (158). – С. 9–18.*
8. *Статистическая динамика и оптимизация управления летательных аппаратов: учеб. пособие / А.А. Лебедев, В.Т. Бобронников, М.Н. Красильщиков, В.В. Малышев. – М.: Машиностроение, 1985. – 280 с.*
9. *Альсаед, С. Нейросетевая модель погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы автономного летательного аппарата / С. Альсаед, В.В. Ефимов, И.В. Фоминов // Известия вузов. Приборостроение. – 2023. – Т. 66, № 6. – С. 441–448.*
10. *Дудкин, А.А. Моделирование нейронных сетей для идентификации состояния подсистем космических аппаратов / А.А. Дудкин, Е.Е. Марушко, В.В. Ганченко // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого*

уровня: материалы V междунар. науч.-практ. конф., Минск, 13–14 мар. 2019 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: В.А. Богуш [и др.]. – Минск, 2019. – Ч. 1. – С. 166–173.

11. *Attention is All You Need / A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems 30: Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017), Long Beach, 4–9 Dec. 2017 / Curran Associates, Inc. – New York, 2017. – P. 5999–6009.*
12. *Лебедев, А.А. Оптимальное управление движением космических летательных аппаратов / А.А. Лебедев, М.Н. Красильщиков, В.В. Малышев. – М.: Машиностроение, 1974. – 199 с.: черт.*



УДК 662.758.4:552.576.1:66.088+629.7

Оптимизация физико-химических свойств водоугольного топлива с помощью технологии электрогидроудара

А.Э. Юницкий[1,2]
доктор философии транспорта

Н.С. Першай[2]
кандидат технических наук

И.О. Борисевич[2]

С.А. Арнаут[2]
кандидат технических наук

[1] ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

[2] ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

Представлены новые данные о возможности применения электрогидроударной установки (ЭГУ) UniThorr 3, сконструированной ЗАО «Струнные технологии» (г. Минск, Беларусь), для производства водоугольного топлива (ВУТ). Цель работы – исследование физико-химических свойств водоугольных суспензий, а также определение влияния модификаторов на реологические и седиментационные характеристики ВУТ, полученного при помощи ЭГУ UniThorr 3 и дезинтегратора мокрого помола «ДМПК-Горизонт» (Россия).

Подтверждена эффективность ЭГУ в производстве ВУТ, что позволяет выявить ключевые преимущества электрогидравлического воздействия. Осуществлён анализ физико-химических свойств частиц бурого угля различного гранулометрического состава, демонстрирующий их структурные особенности. Сравнение технологий получения ВУТ указывает на результативность электрогидроударного метода, обеспечивающего более однородный состав и снижение энергопотребления.

Кроме того, исследовано влияние добавок на состав и теплоту сгорания ВУТ. Их введение повышает эффективность топлива, но увеличивает производственные затраты и экологическую нагрузку. Оптимизация выбора модификаторов может сделать получение ВУТ экономически оправданным. Разработки в данной области являются обязательным направлением программы «ЭкоМир», поскольку нацелены на генерацию тепловой и электрической энергии и производство биогумуса uTerra для нужд экваториального линейного города, общепланетарного транспортного средства, космического индустриального ожерелья «Орбита» и ЭкоКосмоДомов.

Ключевые слова:
бурый уголь, водоугольная суспензия (ВУС), водоугольное топливо (ВУТ), динамическая вязкость, дисперсность, ИК-спектры, космическое индустриальное ожерелье «Орбита» (КИО «Орбита»), электрогидравлический удар, электрогидроударная установка (ЭГУ), UniThorr.

UDC 662.758.4:552.576.1:66.088+629.7

Optimization of Physicochemical Properties of Coal-Water Fuel Using Electrohydraulic Shock Technology

A. Unitsky[1, 2]
Dr. of Philosophy
in Information Technologies
(Transport)

N. Pershai[2]
Ph.D. in Engineering Sciences

I. Borisevich[2]

S. Arnaut[2]
Ph.D. in Engineering Sciences

[1] Astroengineering Technologies LLC,
Minsk, Belarus

[2] Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

New data are presented on the potential application of the UniThorr 3 electrohydraulic discharge equipment (EHDE), designed by Unitsky String Technologies Inc. (Minsk, Belarus), for the production of coal-water fuel (CWF). The aim of the study is to investigate the physicochemical properties of coal-water suspensions and to determine the effect of modifiers on the rheological and sedimentation characteristics of CWF produced using the UniThorr 3 EHDE, as well as the wet grinding disintegrator DMPK-Horizont (Russia).

The efficiency of the EHDE in CWF production has been confirmed, highlighting the key advantages of electrohydraulic treatment. An analysis of the physicochemical properties of brown coal particles with different granulometric compositions was carried out, demonstrating their structural features. A comparison of CWF production technologies indicates the effectiveness of the electrohydraulic shock method, which ensures a more homogeneous composition and reduced energy consumption.

In addition, the influence of additives on the composition and calorific value of CWF was examined. While their introduction increases fuel efficiency, it also raises production costs and environmental burden. Optimization of modifier selection may make CWF production economically viable. Developments in this field constitute a mandatory direction of the EcoSpace program, as they are aimed at generating thermal and electrical energy and producing uTerra biohumus for the needs of the Equatorial Linear City, the General Planetary Vehicle, the Industrial Space Necklace "Orbit," and EcoCosmoHouses.

Keywords:
brown coal, coal-water fuel (CWF), coal-water suspension (CWS), dispersity, dynamic viscosity, electrohydraulic discharge equipment (EHDE), electrohydraulic shock, Industrial Space Necklace "Orbit" (ISN "Orbit"), IR spectra, UniThorr.

Введение

Космическое индустриальное ожерелье «Орбита» (КИО «Орбита») – многоорбитальный индустриально-жилой комплекс с развитой транспортной инфраструктурой, являющийся функциональным аналогом земного экваториального линейного города и опоясывающий планету вдоль экватора. Его основное назначение – снабжение Земли космической продукцией, защита цивилизации от космических угроз (включая метеоритную опасность) и создание технологической базы для освоения дальнего космоса [1–6].

В структуру КИО «Орбита» входят ЭкоКосмоДома (ЭКД) – орбитальные сооружения с изолированным внутренним пространством, приспособленным для жизни в условиях космоса. Такие жилые комплексы предполагают формирование замкнутых биосферных экосистем, гарантирующих полное самообеспечение людей [1–6].

При проектировании подобных экосистем приоритет отдаётся технологиям, использующим электроэнергию. Солнечная энергия, преобразуемая в электричество, может стать основой для энергообеспечения технологических процессов на околоземной орбите. В данном контексте применение электрогидроударной установки (ЭГУ) представляет собой перспективный метод обработки материалов и получения топлива, поскольку не требует традиционных горючих ресурсов и реализуется исключительно за счёт электрической энергии. Питание ЭГУ от солнечных источников делает возможным автономное производство и переработку ресурсов в условиях космических объектов, снижая зависимость от поставок с Земли. Указанное решение особенно актуально для создания самодостаточных промышленных комплексов на орбите, где электрифицированные технологии обеспечивают минимальные затраты и высокую результативность [7–10].

ЭГУ функционирует благодаря электрогидравлическому эффекту, при котором внутри жидкости возникает электрический разряд, вызывающий мощные импульсные давления, способные выполнять механическую работу и запускать сложные физико-химические процессы. Среди ключевых преимуществ данной технологии – экологическая безопасность и высокая энергоэффективность для космической среды [11].

Электрогидроударные технологии применимы в самых разных отраслях – от машиностроения и строительства до медицины и сельского хозяйства. Внедрение ЭГУ может сыграть ключевую роль в успешной реализации переноса на орбиту экологически вредной промышленности, что является одной из целей создания КИО «Орбита» [1–6, 12].

В рамках программы «ЭкоМир», одним из направлений которой является устойчивое развитие экваториального линейного города, предлагается использовать ЭГУ в получении водоугольного топлива (ВУТ) для выработки энергии (в том числе электрической) в земных условиях [7–10], а также для производства биогумуса. Поскольку в угле сосредоточена энергия древнего Солнца, эта энергетика считается не только реликтовой солнечной, но и биоэнергетикой, потому что её «отход» – биогумус uTerra. Исследования подтверждают возможность получения биогумуса из измельчённого бурого угля с помощью технологии гидроудара.

Несмотря на глобальный переход к возобновляемым источникам энергии, уголь остаётся основным элементом мировой энергетики. Широкая доступность и сравнительно низкая стоимость этого ресурса обуславливают возрастающий интерес к совершенствованию технологий его использования.

Сохранение угля в глобальном топливном балансе возможно только при внедрении экологически безопасных методов его добычи и применения. Современные разработки направлены на снижение или полное устранение вредных выбросов и повышение энергоэффективности, что делает уголь потенциально конкурентоспособным в эпоху энергетического перехода. Учитывая, что обеспеченность планеты таким топливным ресурсом значительно выше по сравнению с запасами нефти и природного газа [10], ориентация на использование угля в рамках программы «ЭкоМир» может рассматриваться как наиболее целесообразная.

ВУТ представляет собой композиционную дисперсную систему, включающую мелкодисперсный уголь, воду и при необходимости пластифицирующий агент [11]. Технология производства и сжигания ВУТ начала активно развиваться в СССР в 1970-х годах, а впоследствии получила широкое распространение в Китае и Японии. Сегодня Китай задействует ВУТ в промышленности, а потребление угля в стране продолжает расти, достигнув рекордных 4,4 млрд тонн в 2022 г. [13].

Применение угля в виде ВУТ обладает рядом преимуществ [14]:

- безопасность – топливо не создаёт пожаро- и взрывоопасные ситуации при производстве, транспортировке и эксплуатации;
- экологичность – снижает выбросы загрязняющих веществ (пыль, зола, оксиды азота и серы) и минимизирует образование золы в результате достижения высокой полноты сгорания (до 97 %);

• автоматизация процессов – позволяет полностью механизировать технологические этапы;

• удобство транспортировки – допускает различные способы перемещения топлива.

К основным параметрам ВУТ относятся содержание твёрдой фазы (угля), гранулометрический состав, динамическая вязкость, седиментационная устойчивость, зольность и теплота сгорания. Эти характеристики варьируются в зависимости от сырья и корректируются в процессе производства [8, 14].

Для рационального использования ВУТ необходимо решать ряд задач, включая обеспечение оптимальных реологических свойств при максимальном содержании твёрдой фазы. Такой результат достигается за счёт правильного подбора исходного сырья, регулирования гранулометрического состава или добавления пластифицирующих и стабилизирующих веществ.

Как известно, энергоэффективность, срок хранения и возможность транспортировки ВУТ определяются типом сырья и, соответственно, допустимым содержанием сухого остатка в конечном продукте. Выбор пластифицирующих добавок зависит от дальнейшего применения ВУТ: транспортировки, длительного хранения или сжигания на месте его производства [8, 14].

Таким образом, для решения проблемы эффективного использования ВУТ цель работы заключалась в исследовании физико-химических свойств водоугольных суспензий (ВУС), а также в определении влияния модификаторов на реологические и седиментационные характеристики ВУТ, полученного при помощи ЭГУ UniThorr 3 и дезинтегратора мокрого помола «ДМПК-Горизонт» (Россия).

Объект и методы исследования

Подготовка ВУС для производства топлива осуществлялась на модернизированной ЭГУ UniThorr 3, сконструированной сотрудниками ЗАО «Струнные технологии» (г. Минск, Беларусь), а также на дезинтеграторе мокрого помола «ДМПК-Горизонт» (рисунок 1). Описание и упрощённая электрическая схема функционирования ЭГУ UniThorr представлена в [8–10]. В настоящем исследовании параметры измельчения оптимизированы благодаря усовершенствованной конструкции и точным настройкам ЭГУ, что позволило повысить эффективность получения ВУТ.

Основные компоненты ЭГУ UniThorr 3:

• генератор импульсных токов, обеспечивающий мощные электрические разряды;

• рабочая камера, в которой происходит измельчение угля;

• устройство подачи угля, регулирующее поступление материала;

• насос для подачи воды, поддерживающий рабочую среду;

• классификатор, сортирующий частицы по размеру;

• система фракционного разделения, выделяющая угольные частицы нужного состава.

а) б)

Рисунок 1 – Оборудование для измельчения бурого угля:
а – ЭГУ UniThorr 3; б – «ДМПК-Горизонт»

Технологический процесс начинается с подачи угля из бункера с помощью шнекового питателя в разрядную камеру ЭГУ, где сырьё измельчается в присутствии воды, образуя ВУС. Далее суспензия поступает в классификатор и систему осветления, где происходит разделение ВУС на три фракции с разным гранулометрическим составом, которые направляются в накопительные ёмкости. После того как проведён анализ дисперсионного состава ВУС, фракции в необходимой пропорции подаются в реактор для приготовления ВУТ. Влажность суспензии контролируется в режиме реального времени, что обеспечивает точный расчёт и дозировку компонентов согласно рецептуре. Циркуляцию жидкости в системе поддерживает центробежный насос. Более подробное описание принципиальной технологической схемы получения ВУТ на ЭГУ представлено в [10].

Схема приготовления ВУТ с помощью «ДМПК-Горизонт»: уголь и вода подаются в измельчитель, и после 15 мин работы дезинтегратора ВУС поступает в реактор.

Для исследований использовался бурый уголь марки Б1 класса крупности 0–40 мм. Характеристики применяемого исходного сырья приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики применяемого угля

Показатель	Норма	Факт
Зольность в пересчёте на сухое состояние, A^d, не более, %	28	12,46
Общая влага в рабочем состоянии, W_t^r, не более, %	27	17,46
Выход летучих веществ в пересчёте на сухое беззольное состояние, V^{daf}, %	42–54	49,76
Массовая доля общей серы в пересчёте на сухое состояние, S_t^d, не более, %	1,5	1,44
Низшая теплота сгорания, Q_i^r, не менее, кДж/кг (ккал/кг)	15 420 (3680)	20 503 (4897)

Согласно данным таблицы 1 исходный уголь характеризуется показателями, не превышающими нормированные: относительно невысокой зольностью, низким содержанием общей влаги, высоким значением низшей теплоты сгорания.

Равномерность распределения частиц в объёме суспензии обеспечивалась с помощью верхнеприводной мешалки ULAB US-2200D (Россия) – 1500 об/мин в течение 10 мин. Дисперсионная оценка образцов ВУТ проводилась на лазерном дифракционном анализаторе размеров частиц HORIBA LA-300 (Франция). Реологические исследования осуществлялись с помощью ротационного вискозиметра RheoTest 2 (Германия), оснащённого набором коаксиальных цилиндров (ячеек).

Седиментационная устойчивость образцов ВУТ определялась путём визуальной оценки толщины слоя, отделившегося от суспензии в процессе отстаивания, через заданные промежутки времени. Увеличение высоты слоя свидетельствовало о дестабилизации дисперсной системы и постепенном уплотнении твёрдой фазы [10, 15].

Измерение зольности угля проводилось по ГОСТ Р 55661-2013 [16], выхода гуминовых веществ – по ГОСТ 9517-94 [17]. ИК-спектры фракций бурого угля регистрировались с помощью спектрофотометра с преобразованием Фурье IR Prestige-21 (Япония) в диапазоне волновых чисел от 4000 до 400 см$^{-1}$. Образцы готовились по стандартной методике запрессовки с бромистым калием. Для определения элементарного состава фракций бурого угля использовался анализатор Elementar Vario EL III (Германия).

Характеристика фракций ВУС, полученных на ЭГУ UniThorr 3

В ходе работы ЭГУ после процессов разделения и осветления получены три фракции ВУС с различным гранулометрическим составом (рисунки 2–4).

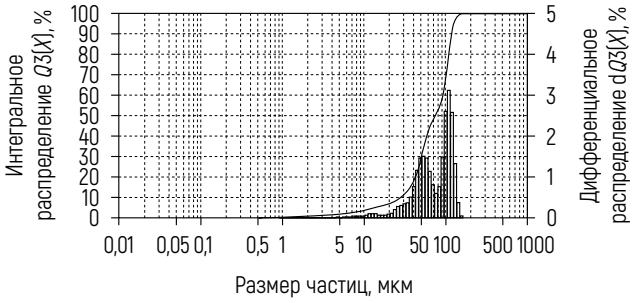


Рисунок 2 – Интегральное и дифференциальное распределение частиц ВУС фракции № 1 по размерам

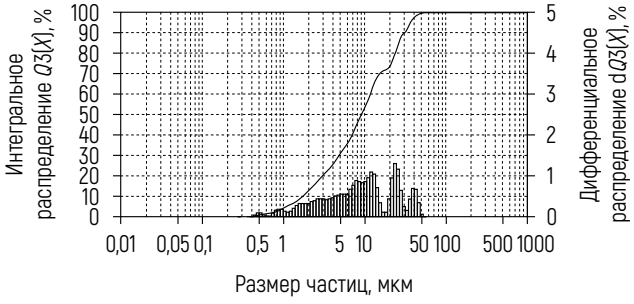


Рисунок 3 – Интегральное и дифференциальное распределение частиц ВУС фракции № 2 по размерам

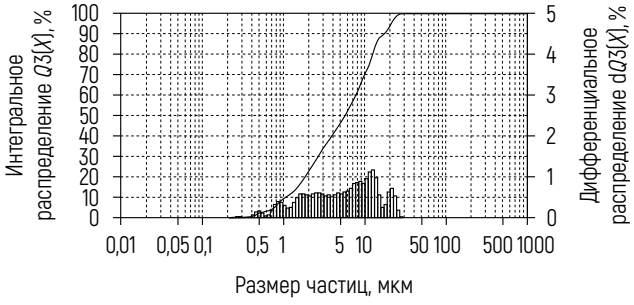


Рисунок 4 – Интегральное и дифференциальное распределение частиц ВУС фракции № 3 по размерам

Фракция № 1 включала частицы размером 1–150 мкм, при этом отдельные элементы достигали 250 мкм (менее 5 %). Фракция № 2 имела диапазон от 0,2 до 50 мкм, фракция № 3 – от 0,2 до 30 мкм.

Использование каждой фракции ВУС по отдельности оказалось неэффективным: высокодисперсная фракция приводила к избыточной вязкости, тогда как грубодисперсная характеризовалась низкой стабильностью и склонностью к образованию плотного осадка. Ранее в [10] обозначено, что разделение ВУС на фракции определено необходимостью достижения оптимального гранулометрического состава, обеспечивающего формирование плотной упаковки частиц. Это, в свою очередь, отвечает ключевым требованиям к ВУТ, таким как реологические свойства и седиментационная устойчивость.

Физико-химические свойства ВУС разных фракций представлены в таблице 2. В ходе исследования установлено, что фракции отличаются не только размерами частиц, но и величиной зольности, т. е. в процессе измельчения происходит уменьшение геометрических размеров и повышение зольности. Её удвоение может быть обусловлено разрывом связей С–С и отделением длинных алифатических цепочек макромолекулы от конденсированного ядра, в котором остаются более крепкие связи органического вещества с минеральной составляющей частиц бурого угля. При этом видно, что выход гуминовых кислот из частиц бурого угля размером менее 50 мкм (ВУС фракций № 1 и 2) также снижается более чем в восемь раз.

Полученные результаты согласуются с данными элементного анализа ВУС фракций № 1–3, представленными в таблице 3.

Массовая доля углерода и водорода в органической части фракций угля снижается при уменьшении размеров частиц. Атомное отношение Н/С характеризует относительное содержание в органической массе образца ненасыщенных фрагментов (т. е. фрагментов с двойными связями С=С), а также соотношение алифатических и ароматических структур. Анализ значений Н/С исследованных образцов (таблица 3) подтвердил, что фракции № 2 и 3 имеют более конденсированную структуру по сравнению с фракцией № 1 (Н/С составляет 1,37). Степень окисленности (атомное отношение О/С) фракций № 2 и 3 в 1,8 раза выше, чем фракции № 1. Это может свидетельствовать о протекании окислительных процессов при электрогидроразряде в местах разрыва связей С–С с ароматическим кольцом макромолекулы угля.

Результаты ИК-спектроскопии показали характерные для бурого угля частотные области поглощения (таблица 4), что подтверждает полученные данные о различиях в строении макромолекул частиц угля разного гранулометрического состава (рисунок 5).

Таблица 2 – Зольность и содержание гуминовых кислот в образцах бурого угля до и после измельчения

Обозначение образца	Краткая характеристика образца	Диапазон размеров частиц, мкм	Зольность, %	Выход гуминовых кислот, %
$БУ_{исх}$	Исходный бурый уголь (до измельчения)	0–40 000	10,75	35,3
$БУ_{РК}$	Измельчённый бурый уголь из рабочей камеры, не попавший в классификатор	Более 250	10,73	31,7
$БУ_{Ф1}$	Измельчённый бурый уголь из ВУС фракции № 1	0–150	9,71	36,4
$БУ_{Ф2}$	Измельчённый бурый уголь из ВУС фракции № 2	0–50	20,21	8,1
$БУ_{Ф3}$	Измельчённый бурый уголь из ВУС фракции № 3	0–30	21,61	7,2

Таблица 3 – Элементный анализ органической части образцов ВУС

Обозначение образца	Элементный состав органической части, %					Атомные отношения	
	C	H	O	N	S	H/C	O/C
$БУ_{Ф1}$	65,59	7,47	24,74	1,54	0,66	1,37	0,28
$БУ_{Ф2}$	56,22	5	36,81	1,33	0,64	1,07	0,49
$БУ_{Ф3}$	54,78	5,6	37,8	1,25	0,57	1,23	0,52

Таблица 4 – Характерные полосы поглощения в ИК-спектрах ВУС

Частотная область, $см^{-1}$	Соответствующие связи и группы
≈ 3419	Гидроксильные группы, имеющие водородную связь
2924; 2852	Валентные колебания CH_3- и CH_2-групп
1630–1610	Валентные колебания сопряжённых двойных связей C=C и ароматических фрагментов
1370–1450	Деформационные колебания связи C–H в алифатических CH_3- и CH_2-группах
1280–1240	Валентные колебания связи C–O карбоновых кислот, сложных эфиров, связи O–H фенолов
1100–1030	Связи C–O циклических и алифатических эфиров и спиртов
800	Связи C=C и C–H ароматических колец
1720–1710	Валентные колебания связи C=O карбоновых кислот
1090; 800; 780; 510; 470	Валентные колебания связи Si–C, Si–O

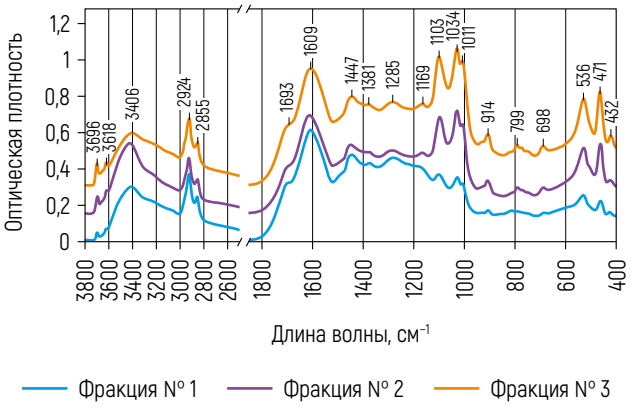


Рисунок 5 – ИК-спектры ВУС

Расчёт значений относительной интенсивности полос поглощения валентных колебаний C=O кислот и валентных колебаний сопряжённых углеродных двойных связей (1610 $см^{-1}$) по отношению к полосам валентных колебаний CH_2- и CH_3-групп (таблица 5) позволяет оценить изменения в сопоставлении количества алифатических и ароматических структур во фракциях ВУС.

Как следует из таблицы 5, данные ИК-спектроскопии согласуются с результатами элементного анализа фракций. Отношение интенсивности полосы валентных колебаний сопряжённых углеродных двойных связей (1610 $см^{-1}$) к интенсивности полос валентных колебаний CH_2- и CH_3-групп для фракции № 1 выше в 1,1–1,2 раза, чем у фракций № 2 и 3, что свидетельствует об образовании более конденсированных ароматических структур и снижении алифатических фрагментов.

Таблица 5 – Соотношение оптических полос ВУС фракций № 1–3

Фракция ВУС	Относительная интенсивность полос поглощения	
	$\frac{D_{1720}}{D_{2920,\,2850}}$	$\frac{D_{1610}}{D_{2920,\,2850}}$
№ 1	0,39	4,49
№ 2	0,53	4,11
№ 3	0,37	3,75

Таким образом, установлено, что в ходе измельчения структура частиц бурого угля трансформируется: уменьшается средний размер, увеличивается удельная поверхность и изменяется морфология. Эти процессы могут носить положительный характер, например содействовать улучшению реакционной способности угля, повышению его горючих свойств и равномерному распределению в ВУС.

Вместе с тем чрезмерное измельчение может иметь негативные последствия, такие как возросшая склонность к агломерации частиц, увеличение энергетических затрат на переработку и ухудшение седиментационных свойств суспензии.

Управление данными изменениями возможно путём оптимизации параметров измельчения, что создаёт условия для достижения максимальной эффективности без потери технологических характеристик.

Следовательно, правильный подбор режимов измельчения позволяет целенаправленно регулировать структуру частиц бурого угля, обеспечивая улучшение его технологических и эксплуатационных свойств в составе ВУТ.

Исследование влияние модификаторов на реологические и седиментационные свойства ВУТ

Ранее в [10] изучалось влияние различного сочетания фракций, получаемых на установке UniThorr 2, на реологические и седиментационные свойства ВУТ. На основе результатов исследования разработан оптимальный гранулометрический состав ВУТ и предложена принципиальная технологическая схема его производства с использованием электрогидроразряда.

Интегральное и дифференциальное распределение частиц ВУТ, полученного на ЭГУ UniThorr 3, представлено на рисунке 6.

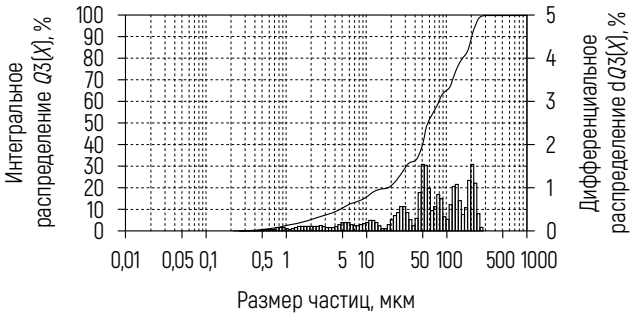


Рисунок 6 – Интегральное и дифференциальное распределение частиц ВУТ, полученного на ЭГУ UniThorr 3

Существенная доля приходится на фракции с размером частиц 20–200 мкм, при этом максимальный размер – 230 мкм, что полностью соответствует требованиям, предъявляемым к данному виду топлива [18].

ВУТ, полученное на установке «ДМПК-Горизонт», имеет несколько иное распределение (рисунок 7).

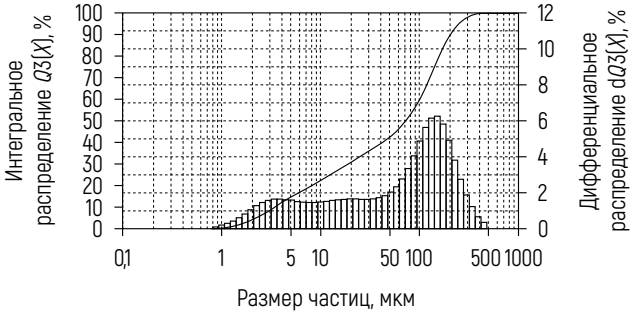


Рисунок 7 – Интегральное и дифференциальное распределение частиц ВУТ, полученного на «ДМПК-Горизонт»

Основная доля приходится на фракции с размером частиц 20–400 мкм. Данный образец ВУТ не удовлетворяет требованиям к этому виду топлива по причине значительного превышения размеров частиц (более 250 мкм), что связано с засорением форсунки во время сжигания [18]. Для получения ВУТ оптимального гранулометрического состава необходимы дополнительные мероприятия (например, центрифугирование или фильтрация) перед подачей на линию сжигания для исключения частиц размером более 250 мкм.

При оценке качества ВУТ учитывались следующие параметры: максимальное содержание твёрдой фазы, вязкость, гранулометрический состав и устойчивость. Для повышения текучести, седиментационной стабильности и массовой доли дисперсной фазы могут вводиться модификаторы вязкости, щелочные реагенты, стабилизаторы.

На основе литературного анализа выбраны оптимальные компоненты, доступные и наиболее часто применяемые в производстве. Далее осуществлены исследования по повышению качественных характеристик ВУТ с учётом физико-химических свойств указанных добавок.

Установлено снижение вязкости ВУТ при использовании лигносульфоната натрия (ЛСТ) и гидроксида натрия (NaOH). Так, при введении 1 и 2 % ЛСТ в ВУТ, полученное на ЭГУ, происходит падение динамической вязкости в шесть раз (с 2,38 до 0,41 Па · с). Благодаря введению 2 % ЛСТ в ВУТ, полученное на «ДМПК-Горизонт», динамическая вязкость уменьшена в пять раз (рисунок 8).

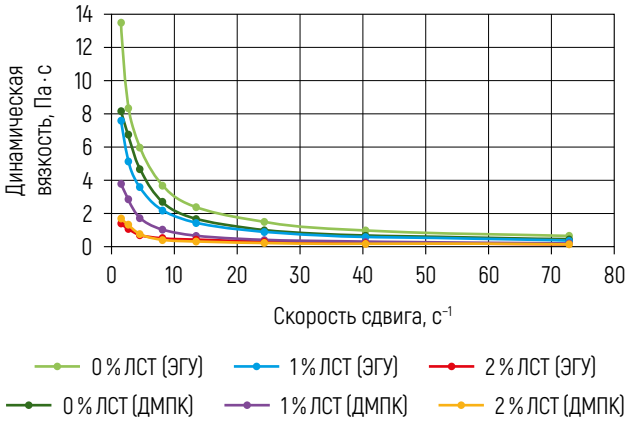


Рисунок 8 – Реологическая зависимость динамической вязкости от скорости сдвига при изменении массовой доли ЛСТ (массовая доля твёрдой фазы в ВУТ 47 %)

Добавление ЛСТ позволило увеличить массовую долю твёрдой фазы ВУТ, полученного на ЭГУ UniThorr 3, с 47

до 50,3 %, что составило 7 % (из расчёта на сухой остаток) (рисунок 9).

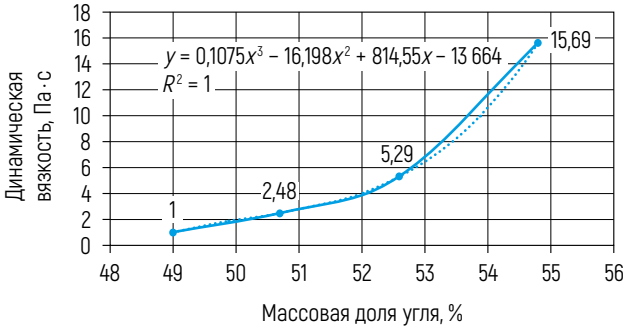


Рисунок 9 – Зависимость динамической вязкости ВУТ, полученного на ЭГУ UniThorr 3, от массовой доли твёрдой фазы (скорость сдвига 13,5 $с^{-1}$)

Введение ЛСТ в ВУТ, произведённое на «ДМПК-Горизонт», увеличило массовую долю угля с 48,5 до 52,4 %, что соответствует приросту массы сухого остатка на 8 %. Увеличение массовой доли ЛСТ до 2 %, рассчитанной по массе угля, позволяет получать ВУТ, отвечающее требованиям к вязкости согласно [18], при массовой доле угля 53–54 % (рисунок 10). При этом относительный прирост массы сухого остатка может достигать 11 %. При данных соотношениях воды, твёрдой фазы и модификатора обеспечивается седиментационная стабильность ВУТ более 7 суток.

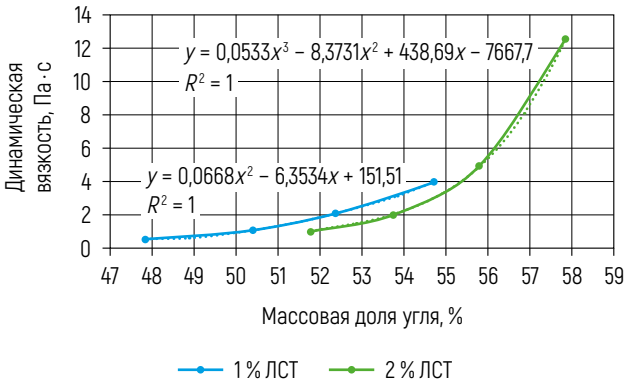


Рисунок 10 – Зависимость динамической вязкости ВУТ, полученного на «ДМПК-Горизонт», от массовой доли твёрдой фазы (скорость сдвига 13,5 $с^{-1}$)

Щелочной реагент (в данном случае NaOH) может работать в составе ВУТ как разжижитель. Такие свойства щелочей обусловлены способностью выделять из бурого угля гуматы, которые выполняют роль модификаторов вязкости [19–21].

Установлено, что добавление от 0,5 до 1 % (из расчёта на сухой остаток) NaOH к ВУТ, полученному на ЭГУ UniThorr 3, приводит к снижению динамической вязкости (рисунок 11).

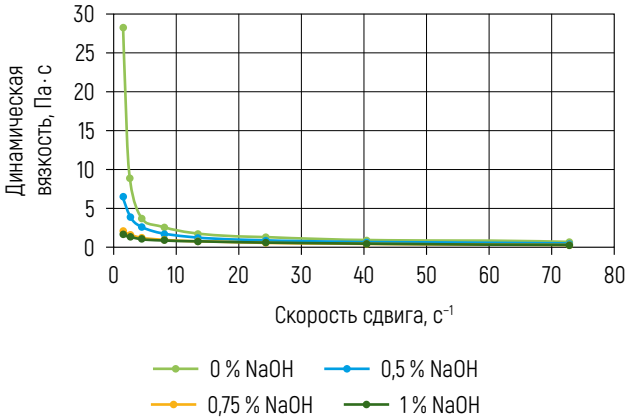


Рисунок 11 – Зависимость динамической вязкости оптимального состава ВУТ, полученного на ЭГУ UniThorr 3, от скорости сдвига при различном содержании NaOH

Введение более 0,75 % NaOH в ВУТ несущественно влияет на падение динамической вязкости. Динамика изменения данного показателя при увеличении массовой доли твёрдой фазы отражена на рисунке 12 (скорость сдвига 13,5 $с^{-1}$).

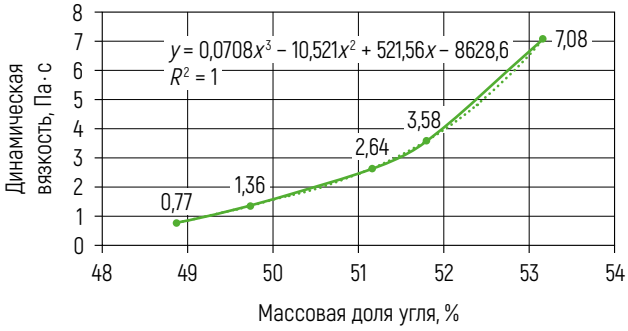


Рисунок 12 – Зависимость динамической вязкости ВУТ, полученного на ЭГУ UniThorr 3, от массовой доли твёрдой фазы при введении 0,75 % NaOH (скорость сдвига 13,5 $с^{-1}$)

Применение 0,75 % NaOH позволило получить ВУТ с массовой долей угля до 50,5 %, при этом прирост массовой доли угля в суспензии составил 3 %.

На рисунке 13 показано стабилизирующее действие NaOH, лауретсульфата натрия (SLES 70), карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ), ЛСТ на ВУТ, полученное на ЭГУ UniThorr 3.

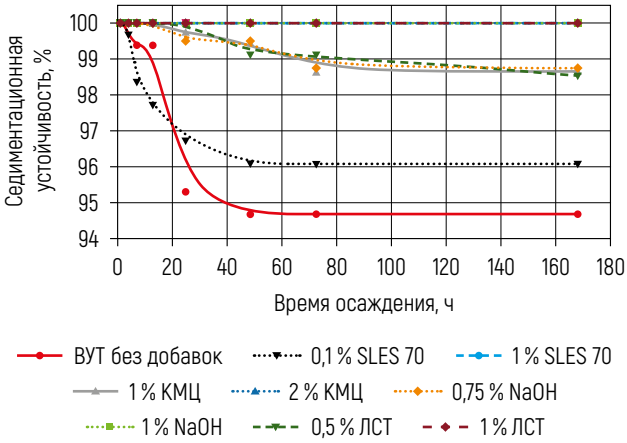


Рисунок 13 – Зависимость седиментационной устойчивости ВУТ, полученного на ЭГУ UniThorr 3, от времени осаждения при различных добавках

Более семи суток отмечалась абсолютная устойчивость ВУТ с применением стабилизаторов 1 % SLES 70, 2 % КМЦ, 1 % NaOH, 1 % ЛСТ. Однако следует обозначить, что при добавлении 0,5 % КМЦ наблюдался резкий рост динамической вязкости ВУТ. Это свойство ограничивает введение КМЦ в качестве стабилизатора.

После определения низшей теплоты сгорания исходного бурого угля для ВУТ (Q^r_{t1}) по ГОСТ 27313-87 [22] произведён расчёт теплоты сгорания ВУТ в рабочем состоянии [23]:

$$Q^r_{t1} = \frac{100 - W^r_{t2}}{100 - W^r_{t1}} (Q^r_{i1} + \gamma W^r_{t1}) - \gamma W^r_{t2},$$

где W^r_{t1}, W^r_{t2} – общая влага угля и ВУТ соответственно, % (таблица 1);

γ = 5,86 – при расчёте в ккал/кг;

γ = 24,42 – при расчёте в кДж/кг.

Полученные результаты представлены в таблице 6.

При введении 0,75 % NaOH в ВУТ расход данной добавки составляет 3,8 кг/т сухого угля, что в пересчёте равно 12 USD/т (по состоянию на 01.01.2025). При использовании 1 % ЛСТ необходимо 5,2 кг/т сухого угля, что в пересчёте – 4,7 USD/т. При средней цене бурого угля марки Б1 на уровне 40 USD/т применение NaOH обуславливает рост себестоимости на 30 %, тогда как добавление 1 и 2 % ЛСТ увеличивает её на 11,8 и 23,5 % соответственно. Таким образом, дополнительные компоненты повышают теплоту сгорания ВУТ на 13 %, а производственные затраты на 30 %, что экономически невыгодно.

Заключение

В рамках реализации программы «ЭкоМир», предполагающей производство энергии и биогумуса в экваториальном линейном городе для нужд общепланетарного транспортного средства и КИО «Орбита», рассматривается возможность применения угля как природного сырья с достаточными запасами. В перспективе ежегодный объём потребления может достигнуть миллиарда тонн.

В ходе исследования проанализирована работа ЭГУ в процессе производства ВУТ, изучены ключевые параметры такого топлива и выявлены особенности электрогидравлического эффекта.

Полученные данные подтверждены научными экспериментами, при проведении которых использовалась модернизированная установка UniThorr 3, созданная специалистами ЗАО «Струнные технологии».

Представлены результаты изучения физико-химических свойств частиц бурого угля ВУС различного гранулометрического состава, показавшие вариации в макромолекулярной структуре.

Таблица 6 – Результаты расчёта теплоты сгорания ВУТ с различными добавками

Состав ВУТ	Массовая доля угля, %		Теплота сгорания, кДж/кг		Прирост теплоты сгорания, %
	исходная	конечная	исходная	конечная	
Оптимальный состав ВУТ (ЭГУ UniThorr 3), 0,75 % NaOH	49	50,5	11 179,3	11 596,3	3,7
Оптимальный состав ВУТ (ЭГУ UniThorr 3), 1 % ЛСТ	47	50,3	10 623,4	11 540,7	8,6
ВУТ «ДМПК-Горизонт», 1 % ЛСТ	48,5	52,4	11 040,3	12 124,5	9,8
ВУТ «ДМПК-Горизонт», 2 % ЛСТ	48,5	53,6	11 040,3	12 458,1	12,8

Сопоставление характеристик ВУТ, произведённого на ЭГУ UniThorr 3 и «ДМПК-Горизонт», продемонстрировало, что внедрение электрогидроударной технологии обуславливает формирование более однородного гранулометрического состава и снижает энергозатраты по сравнению с традиционными методами измельчения.

Экспериментальные данные подтверждают, что введение добавок увеличивает содержание твёрдой фазы в ВУТ, однако сопровождается ростом выбросов загрязняющих веществ и удорожанием технологии. Дополнительные компоненты способствуют повышению теплоты сгорания ВУТ на 13 %, а производственных затрат на 30 %, что делает технологию экономически невыгодной уже по одному этому показателю. Таким образом, применение модификаторов может быть оправдано при условии, если удастся подобрать добавки, обеспечивающие положительный эффект, но позволяющие снизить стоимость производства как минимум в два раза.

Список основных источников

1. *Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А.Э. Юницкий. – Гомель: Инфотрибо, 1995. – 337 с.: ил.*
2. *Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А.Э. Юницкий. – Силакрогс: ПНБ принт, 2019. – 576 с.*
3. *Юницкий, А.Э. Создание математической модели общепланетарного транспортного средства: разгон маховиков, прохождение атмосферы, выход на орбиту / А.Э. Юницкий, Р.А. Шаршов, А.А. Абакумов // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 77–83.*
4. *Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы III междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 12 сент. 2020 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск: СтройМедиаПроект, 2021. – 516 с.*
5. *Юницкий, А.Э. Инженер: автобиография / Анатолий Юницкий. – Минск: Белпринт, 2021. – 400 с.: ил.*
6. *Unitsky, A. System Foundations of Non-Rocket Near Space Industrialization: Problems, Ideas, Projects / A. Unitsky. – Minsk: Gradient, 2021. – 568 p.*
7. *Юницкий, А.Э. Комплексное использование бурого угля в реликтовой солнечной биоэнергетике / А.Э. Юницкий, В.В. Василевич, Н.С. Першай // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы V междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 23–24 сент. 2022 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2023. – С. 120–127.*
8. *Юницкий, А.Э. Использование электрогидроудара в технологии приготовления водоугольного топлива / А.Э. Юницкий, Н.С. Першай, С.А. Арнаут // Эффективность инженерных систем и энергосбережение: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф., Брест, 19–20 окт. 2023 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Брест. гос. техн. ун-т; под ред. В.Г. Новосельцева. – Брест, 2023. – С. 127–135.*
9. *Юницкий, А.Э. Варианты применения электрогидроударной установки в условиях проживания людей в космосе / А.Э. Юницкий, Н.С. Першай, С.А. Арнаут // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 322–335.*
10. *Электрогидроударная установка для получения водоугольного топлива / А.Э. Юницкий, Н.С. Першай, С.А. Арнаут [и др.] // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 202–210.*
11. *Юткин, Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л.А. Юткин. – Л.: Машиностроение, 1986. – 253 с.*
12. *Юницкий, А.Э. Инженерия. Мир как инженерный проект / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 22–135.*
13. *Bhandari, S.R. China's Coal Use Increased to a Record High in 2022, IEA Says / S.R. Bhandari // RFA. – URL: https://www.rfa.org/english/news/environment/coal-07282023072108.html. – Publ. date: 28.07.2023.*
14. *Баранова, М.П. Комплексная технология получения и транспорта водоугольных топливных суспензий*

из углей разной степени метаморфизма / М.П. Баранова // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2011. – Т. 4, N° 6. – С. 613–619.

15. *Сверчков, И.П. Снижение выбросов загрязняющих веществ при термической утилизации отходов углеобогащения: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.36 / Сверчков Иван Павлович; С.-Петерб. горный ун-т. – СПб., 2019. – 197 л.*
16. *Топливо твёрдое минеральное. Определение зольности: ГОСТ Р 55661-2013. – Введ. 28.10.2013. – М.: Стандартинформ, 2014. – IV, 29 с.*
17. *Топливо твёрдое. Методы определения выхода гуминовых кислот: ГОСТ 9517-94. – Взамен ГОСТ 9517-76; введ. 01.01.1997. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1996. – III, 9 с.*
18. *Долинский, А.А. Водоугольное топливо: перспективы использования в теплоэнергетике и жилищно-коммунальном секторе / А.А. Долинский, А.А. Халатов // Промышленная теплотехника. – 2007. – Т. 29, N° 5. – С. 70–79.*
19. *Худяков, Д.С. Композиционные водоугольные топлива на базе бурых углей Канско-Ачинского бассейна: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07 / Худяков Денис Сергеевич; Ин-т горючих ископаемых – науч.-техн. центр по комплекс. перераб. твёрдых горючих ископаемых» М-ва энергетики Рос. Федерации. – М., 2003. – 24 с.*
20. *Баранова, М.П. Получение топливных водоугольных суспензий с использованием вторичных ресурсов / М.П. Баранова, В.А. Кулагин // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2011. – N° 1 (6). – С. 3–6.*
21. *Мурко, В.И. Получение стабильных бинарных топливных систем / В.И. Мурко, В.А. Кулагин, М.П. Баранова // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – Т. 10, N° 8. – С. 985–992.*
22. *Топливо твёрдое. Обозначения аналитических показателей и формулы пересчёта результатов анализа для различных состояний топлива: ГОСТ 27313-89. – Взамен ГОСТ 27313-87; введ. 01.07.90. – М.: Гос. ком. СССР по упр. качеством продукции и стандартам, 1990. – I, 13 с.*
23. *Баранова, М.П. Технология получения и использования топливных водоугольных суспензий из углей различной степени метаморфизма: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.01 / Баранова Марина Петровна; Сибир. федер. ун-т, Сибэкотехника. – М., 2014. – 38 с.*

УДК 628.87+681.5+629.7

Автоматизированная система управления микроклиматом биосферного шатра

А.Э. Юницкий[1, 2]
доктор философии транспорта

А.Р. Грибоедова[2]

М.М. Давыдик[2]

А.В. Гарбачёнок[2]

[1] ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

[2] ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

Изучены перспективы и возможности использования автоматизированной системы управления микроклиматом (АСУмк) в биосферных комплексах, которые планируется разместить в шатрах с покрытием мембранного типа, выполняющих функцию оранжереи как объекта общественного назначения. Цель исследования – разработка АСУмк для подобного объекта.

Отмечена актуальность моделирования пространств с регулируемым микроклиматом для создания контролируемой среды обитания, способной поддерживать жизнь в искусственных условиях, максимально приближенных к естественным земным. Обобщён опыт применения систем автоматизированного управления микроклиматом в теплицах и оранжереях.

Представлен простой и эффективный способ мониторинга и регистрации параметров микроклимата в биосферном шатре мембранного типа, предполагающий использование беспроводной сенсорной сети. Обоснованы преимущества и целесообразность предложенного технического решения как гибкого комплексного подхода к построению АСУмк биосферного мембранного шатра. Обозначены дальнейшие направления исследования и проектных разработок применительно к ЭкоКосмоДому при возведении космического индустриального ожерелья «Орбита».

Ключевые слова:
автоматизация, биосферный комплекс, мембранный шатёр, микроклимат, мониторинг, регулирование, система управления, ЭкоКосмоДом на планете Земля (ЭКД-Земля), энергоэффективность.

UDC 628.87+681.5+629.7

Automated Microclimate Control System for Biosphere Tent

A. Unitsky[1, 2]
Dr. of Philosophy
in Information Technologies
(Transport)

A. Griboedova[2]

M. Davydik[2]

A. Garbachenok[2]

[1] Astroengineering Technologies LLC,
Minsk, Belarus

[2] Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

The article studies the prospects and potential of using an automated microclimate control system (ACSmc) in biosphere complexes, which are planned to be located in tents with membrane-type cover serving as public greenhouse. The study aims to develop an ACSmc for such facility.

The paper emphasizes the relevance of modeling spaces with a controlled microclimate to create a controlled habitat capable of supporting life in artificial conditions as close as possible to natural terrestrial settings. The experience of using automated microclimate control systems in greenhouses is summarized.

A simple and effective method for monitoring and recording microclimate parameters in membrane-type biosphere tent is presented, involving the use of a wireless sensor network. The advantages and feasibility of the proposed technical solution as a flexible integrated approach to design an ACSmc for a biosphere membrane tent are substantiated. Further directions of study and search for project developments are outlined in relation to the EcoCosmoHouse during the construction of Industrial Space Necklace "Orbit."

Keywords:
automation,
biosphere complex,
control system,
EcoCosmoHouse
on planet Earth (ECH-Earth),
energy efficiency,
membrane tent,
microclimate,
monitoring, regulation.

Введение

Моделирование пространств с регулируемой средой обитания – перспективная область для научных исследований. Актуальность данного направления обусловлена острой необходимостью поиска путей устранения глобальных экологических проблем современности, таких как деградация биосферы Земли, исчерпание невозобновляемых ресурсов, масштабный ущерб от техногенных воздействий. Решения в области моделирования биосферных пространств, способных поддерживать стабильность внутренней среды, открывают возможности для понимания ключевых принципов управления замкнутыми экосистемами, что позволит в будущем осваивать не только территории с экстремальным климатом на Земле, но и ближний космос.

Одной из концепций в сфере моделирования закрытого биосферного пространства является ЭкоКосмоДом на планете Земля (ЭКД-Земля), предполагающий использование системы возобновляемой энергии и нулевое воздействие на окружающую среду. ЭКД-Земля представляет собой прототип экологичного космического дома (ЭкоКосмоДом – ЭКД) – автономного жилого поселения биосферного типа, предназначенного для комфортной жизни и эффективной работы на околоземной орбите [1].

Внутри ЭКД планируется создание замкнутой экосистемы земного типа, которая включает искусственно полученную гравитацию, живую плодородную почву, флору и фауну, атмосферу с регулируемыми параметрами (температура, влажность, давление, др.) для неограниченно длительного, автономного, экокомфортного проживания и деятельности как отдельных людей и их групп, так и многотысячных поселений на экваториальных орбитах планеты, а также в открытом ближнем и дальнем космосе [2].

Следует отметить, что физические процессы, протекающие в ЭКД, направлены на максимальное обеспечение цикличности обмена веществ, экономию и рациональное использование энергоресурсов. Это требует глубокого анализа, систематизации, моделирования и прогнозирования всех процессов, происходящих внутри замкнутой среды биосферного типа.

Цель исследования – изучение перспективы и возможности внедрения автоматизированной системы управления микроклиматом (АСУмк) в биосферные комплексы, которые планируется размещать в шатрах мембранного типа, выполняющих функцию оранжереи как объекта общественного назначения, а также разработка состава АСУмк данных комплексов как пространства с регулируемым микроклиматом.

Использование пилотного шатра мембранного типа как биосферного комплекса универсального применения

Для валидации модели пространства с регулируемым микроклиматом целесообразно построить экспериментальное сооружение, имитирующее условия криптоклиматического комплекса. Данный объект может иметь форму шатра, светопрозрачное плёночное покрытие и все необходимые инженерные коммуникации для поддержания оптимального внутреннего климата.

ЗАО «Струнные технологии» (г. Минск, Беларусь) проведены предпроектные работы по размещению биосферного шатра на территории Крестьянского фермерского хозяйства «Юницкого» (г. Марьина Горка, Беларусь). Предложены принципиальные конструктивные и объёмно-планировочные решения для шатров с прямоугольным (рисунок 1) и круглым (рисунок 2) начертаниями в плане [3].

Рисунок 1 – Вид сверху на прямоугольный шатёр мембранного типа (модель)

Рисунок 2 – Вид сверху на круглый шатёр мембранного типа (модель)

Концептуально оба варианта шатра спланированы как оранжереи с субтропическим климатом, разделённые на тематические зоны и сектора. В каждом сооружении предусмотрена возможность выделения площадки для проведения общественных мероприятий.

Круглая форма здания (рисунок 3) с точки зрения эффективности использования объёма и компактности размещения обладает определёнными преимуществами по сравнению с прямоугольной конструкцией [3].

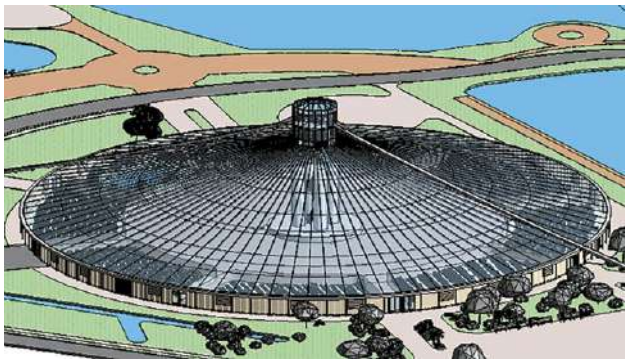


Рисунок 3 – Общий вид круглого шатра мембранного типа (вариант)

В круглом шатре при проектировании системы обогрева и охлаждения применены энергоэффективные решения. Система отопления (пассивное солнечное) и охлаждения (посредством грунтовой воды) сконструирована в виде заполненных жидкостью труб и воздуховодов, расположенных в центральных опорах сооружения (рисунок 4). Вода, имеющая температуру 8–10 °C, попадает в трубы из подземной скважины. Объём поступающей воды регулируется с помощью клапана с электроприводом, установленного на подающем трубопроводе. В вентиляционной башне шатра расположены вентиляторы, которые пропускают воздух по воздуховодам. На воздухозаборе каждого вентилятора находятся клапаны с электроприводом, которые в зависимости от периода года работают как приточные либо как вытяжные.

Вода, проходя по трубам, отдаёт температуру воздуху, который через вентиляционные решётки распределяется по пространству шатра. Для сохранения избыточного тепла, полученного в летний период, предусмотрен грунтовый аккумулятор, расположенный под фундаментом шатра. В зимний период он позволяет увеличить температуру воды, выходящей из теплообменника, и повторно использовать её для циркуляции в системе.

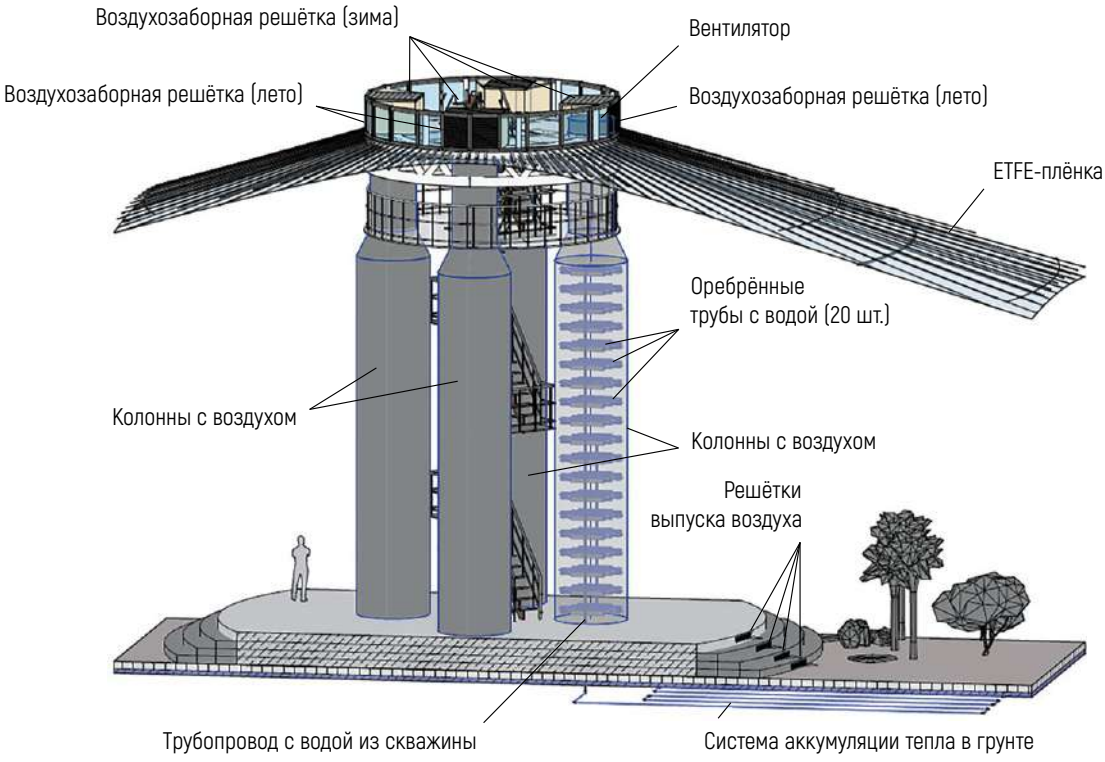


Рисунок 4 – Система обогрева и охлаждения мембранного шатра

Независимо от конфигурации и габаритных размеров, мембранный шатёр – пример имитационной модели пространства с регулируемыми природно-климатическими условиями, благоприятными для жизни человека, животных и растений.

Проект биосферного мембранного шатра является техническим экспериментом, который предоставляет возможность испытать оригинальные конструкции и инженерные решения на практике, а также создаёт уникальную опытную площадку для проведения научных исследований в пространстве с регулируемым микроклиматом, что позволит систематизировать результаты для более глубокого понимания закономерностей энергетических процессов, протекающих в замкнутых экосистемах.

Уровни автоматизации и стратегии управления в биосферном мембранном шатре

Применение систем автоматизации и диспетчеризации – неотъемлемая часть любого современного технологического процесса. Главное назначение систем автоматического управления состоит в возможности обеспечить высокую точность, быстродействие и минимальное перерегулирование на выходе объекта управления, затрачивая при этом как можно меньше энергоресурсов на входе.

Рассматривая мембранный шатёр как элемент биосферного комплекса, необходимо отметить основные цели, которые преследует внедрение АСУмк:

- автоматическое маркирование оптимальных климатических параметров;
- энергоэффективное использование возможностей исполнительных систем;
- оптимизация работы обслуживающего персонала при выполнении ежедневных рутинных операций.

Проектирование АСУмк биосферного мембранного шатра включает ряд важных этапов:

- автоматическое маркирование факторов окружающей среды и реакции на них растений;
- определение параметров регулирования микроклимата;
- выбор типов датчиков, алгоритмов управления исполнительными механизмами и определение способов передачи данных;
- формирование программно-аппаратного комплекса.

В целом концепция построения архитектуры АСУмк биосферного мембранного шатра может быть аналогична промышленной. В то же время существуют границы, которые принципиально разделяют указанные области с точки зрения внедрения автоматизации. В биосферном мембранном шатре следует применять датчики, исполнительные механизмы, материалы для контроля и измерения, способные работать во влажной среде, не выходя при этом за пределы калибровки. Программные алгоритмы управления должны адаптироваться к динамическим ситуациям с учётом конкретных стадий роста и развития растений, микроклиматических факторов, а также биологических, географических, природных особенностей, что существенно отличает АСУмк теплиц и оранжерей от промышленных аналогов. Кроме того, цель АСУмк биосферного мембранного шатра – оптимизация процессов, предусматривающая детальный анализ, прогнозирование и стратегическое планирование.

АСУмк биосферного мембранного шатра (рисунок 5) представляет собой комплексную систему и включает следующие уровни:

- измерительных датчиков;
- исполнительных устройств;
- функциональный;
- системный [4].

Измерительные датчики подразделяются на внешние (метеостанция) и внутренние. Метеостанция позволяет проводить метеорологические наблюдения, прогнозировать погодные явления, отслеживать скорость и направление ветра, атмосферное давление, количество осадков, уровень солнечной радиации и УФ-излучения. Внутренние датчики измеряют температуру воздуха, воды и грунта, относительную влажность воздуха, уровень освещённости и концентрацию углекислого газа.

Уровень исполнительных устройств включает двигатели насосов и вентиляторов, приводы фрамуг, форсунок для распыления воды, а также регулируемые узлы контуров обогрева.

Функциональный уровень АСУмк относится ко всему технологическому оборудованию мембранного шатра, которое отвечает за реализацию определённой операции: орошение, обогрев, охлаждение, освещение, удобрение, проветривание. В биосферном мембранном шатре на работу каждого исполнительного механизма оказывают влияние как переменные параметры окружающей среды, так и факторы, обусловленные воздействием другого оборудования, поэтому при проектировании необходимо учитывать интегрированное управление на уровне системы и объединение всех функций и элементов во взаимосвязанный процесс.

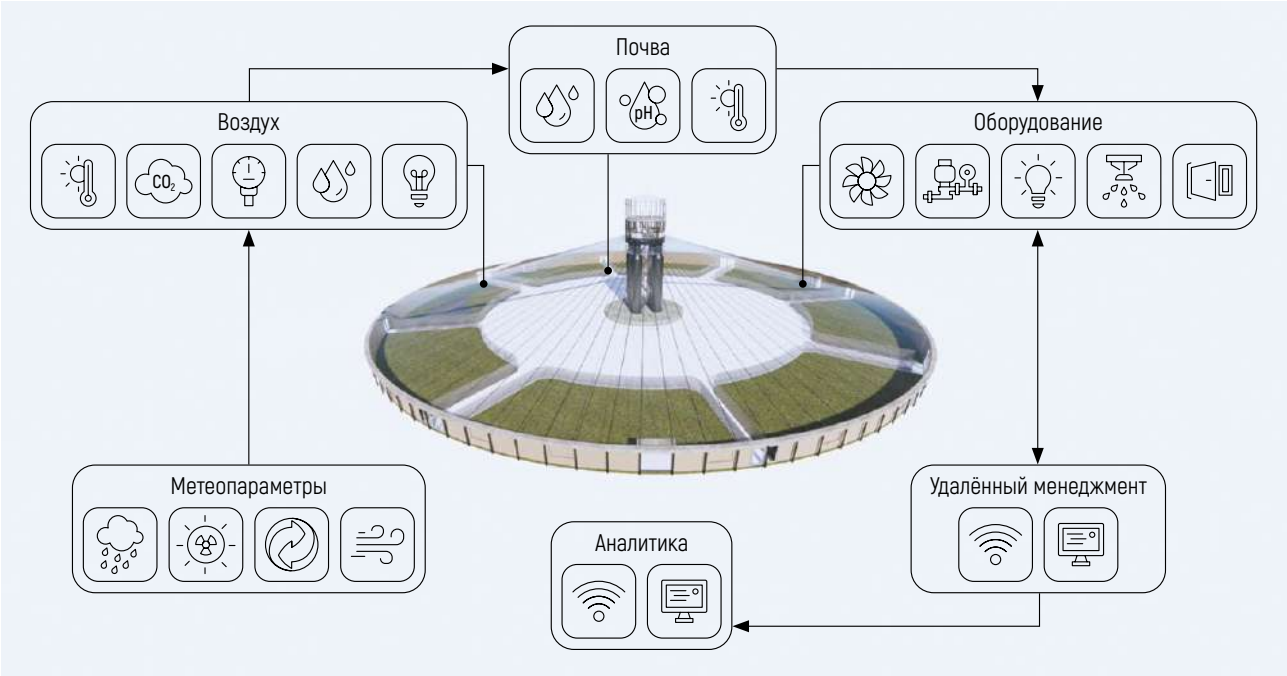


Рисунок 5 – Модель АСУмк биосферного мембранного шатра

Данная задача реализуется программными средствами АСУмк, которые синхронно осуществляют мониторинг всех аспектов общего технологического процесса. Оптимальный алгоритм должен не только синхронизировать управление, но и уметь прогнозировать изменения и подавать управляющие сигналы на исполнительные механизмы заблаговременно, а не в тот момент, когда ситуация близка к критической.

Системный уровень АСУмк биосферного мембранного шатра обеспечивает выполнение ключевых процессов: сбор, обработку и передачу данных, а также структуризацию архивов и отображение информации в удобной для анализа форме. Это позволяет проводить качественную аналитику, выявлять критические аспекты, при необходимости вносить корректировки и управлять всеми технологическими процессами максимально гибко и эффективно.

В настоящее время алгоритмы управления АСУмк биосферного мембранного шатра могут представлять собой комбинацию различных прогнозирующих стратегий и методологий.

Упреждающее управление актуально в случае, если реакция системы предсказуема для данного набора условий. Уравнение энергетического баланса применяется для расчёта влияния текущего состояния системы на контролируемый параметр, в результате чего исполнительные механизмы активируются при отклонении от требуемого значения. Подход с обратной связью позволяет уменьшить ошибки ввода/вывода, поскольку помехи выявляются до того, как они смогут повлиять на систему и вызвать существенное отклонение. Совместное использование коррекции обратной связи и упреждающего управления обеспечивает высокую точность, учитывает взаимозависимые отношения и множественное воздействие тепличного оборудования [5].

В самонастраивающейся и адаптивной модели внутренние параметры корректируются таким образом, чтобы минимизировать ошибки и повысить эффективность работы. Данный метод предполагает включение в процесс инструментов искусственного интеллекта (нечёткая логика и генетический алгоритм). В адаптивной модели характеристики самонастраивающегося контроллера постоянно совершенствуются, а регулятор самостоятельно подстраивает параметры к изменяющимся условиям. Поскольку биосферный мембранный шатёр представляет собой многопараметрическую систему, то к нему может быть применима модель управления, предполагающая многоступенчатый адаптивный контроль характеристик.

Таким образом, прогнозирующие модели позволяют рассматривать как динамические ситуации, так и уникальные технологические процессы, для которых не имеется единой общей стратегии.

Традиционные решения и существующие технологии для автоматизации теплиц и оранжерей: преимущества и недостатки

Основные контролируемые параметры микроклимата в теплицах и оранжереях – температура воздуха, относительная влажность, уровень освещённости и концентрация углекислого газа. Дополнительными параметрами являются температура и уровень pH почвы, а также температура воды для полива, давление воздуха (рисунок 6).

Параметры микроклимата оказывают непосредственное влияние на такие процессы жизнедеятельности растения, как фотосинтез, дыхание, испарение, корневое питание. Любые отклонения от благоприятного режима отрицательно отражаются на росте и развитии. Важно учитывать, что растению в каждой фазе его жизненного цикла требуется определённая температура окружающей среды. Для нормального роста, развития и плодоношения необходимы влага и углекислый газ, причём в соотношениях, обусловленных температурой воздуха [6].

Таким образом, для поддержания в биосферном мембранном шатре оптимального микроклимата нужно произвести расчёт ключевых параметров следующих процессов: обогрева, охлаждения, вентиляции, орошения, освещения, а также проанализировать значение и эффективность их автоматизации.

Для того чтобы получить объективную оценку применения АСУмк в биосферном мембранном шатре, требуется тщательное изучение (с целью выявления преимуществ и недостатков) традиционных подходов и существующих технических решений, используемых для регулирования микроклимата в теплицах и оранжереях.

Регулирование температуры воздуха может обеспечиваться с помощью систем трубного обогрева и вентиляции. Система обогрева включает несколько независимых контуров: почвенный, боковой (средняя и верхняя зоны) и кровельный обогрев. Регулирование температуры теплоносителя проводится путём смешивания прямой и обратной воды с помощью клапанов на распределительном коллекторе, имеющих электрический исполнительный механизм. Во всех зонах размещаются датчики температуры воздуха (рисунок 7).

Автоматизированная система обогрева купола состоит из отопительных регистров, установленных на различных высотах по периферии оранжереи. Благодаря работе данной системы в холодное время года снег не залёживается и быстро тает, а значит, растения получают больше естественного света.

Автоматизация системы почвенного обогрева обеспечивает требуемую температуру на определённой глубине. Недостатком этого решения может стать выделение пара из земли, что приводит к увеличению влажности и ухудшению условий для обслуживающего персонала и посетителей.

Рисунок 6 – Параметры микроклимата в оранжерее

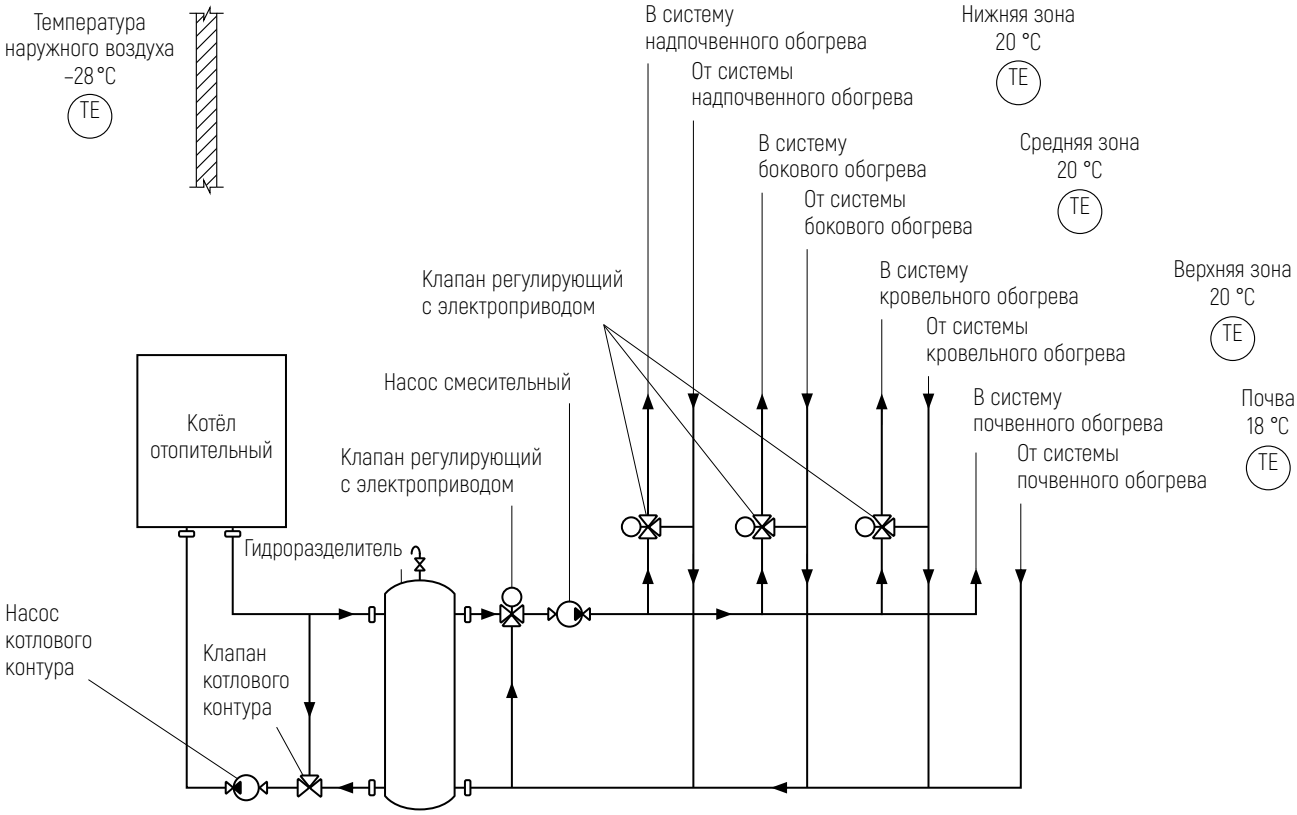


Рисунок 7 – Схема регулирования температуры воздуха в оранжерее, оборудованной системой трубного обогрева

При достижении температуры воздуха в оранжерее на 4–5 °C выше установленной нормы в действие вступает система вентиляции. Регулирование температуры воздуха осуществляется с помощью автоматического управления двигателями вентиляторов, расположенных в зонах оранжереи, а также посредством электрических приводов фрамуг, размещённых на различных вертикальных уровнях (рисунок 8).

Вентиляторы, отводя нагретый воздух, который поднимается вверх, перемешивают воздушные массы и устанавливают среднюю температуру, что предохраняет растения от температурного шока. Фрамуги закрываются автоматически при продолжительных сильных порывах ветра и мощном ливневом фронте.

Для поддержания заданных параметров микроклимата предусматривается система адиабатического охлаждения воздуха. Благодаря её функционированию тепловая энергия поглощается водой из воздуха, абсолютная и относительная влажность увеличивается, а температура воздуха снижается. В системе охлаждения, оснащённой вытяжными вентиляторами, насосы обеспечивают циркуляцию воды для охлаждения через пористую подушку на одном конце оранжереи и над ней. Затем воздух снаружи протягивается через влажные кассеты с помощью вытяжных вентиляторов, работающих на другом конце оранжереи.

Рисунок 8 – Ограждающие конструкции оранжереи Ботанического сада Санкт-Петербургского государственного университета [7]

Автоматизированная система водоподготовки предназначена для очистки воды от примесей и улучшения её качества для полива. Недостаток такого решения – мембраны быстро засоряются солями кальция, магния, другими примесями, а их регулярная замена является дорогостоящим мероприятием. Выход из строя системы сказывается на функционировании смежных автоматизированных систем (полив, туманообразование, дождевание).

Автоматизированная система туманообразования создаёт мелкодисперсное распыление, дополнительно обеспечивая для растений оптимальную относительную влажность воздуха и снижая на несколько градусов его температуру. Данная система может работать как в дневное, так и в вечернее время, постоянно охлаждая и увлажняя поверхность листьев растений.

Автоматизированная система дождевания запускается в тёплое время года один раз в день для полива растений, промыва почвы от избыточного засоления, уменьшения прогрева поверхностных слоёв воздуха и дополнительного увеличения влажности. В холодные и облачные дни необходимость в ежедневном дождевании отсутствует. Такая система включается автоматически в самое тёплое время суток и может быть автоматизирована по таким параметрам, как общее количество потребляемой воды из баков водоподготовки либо продолжительность работы [8].

Практика применения автоматизированной системы дождевания в различных оранжереях мира показала, что не все территориальные зоны, а соответственно, не все находящиеся в них растения попадают в зону полива. Автоматическое дождевание эффективно рассматривать в качестве дополнения к основному поливу – ручному шланговому орошению. При этом такое решение может быть затратным, если расходуется большое количество очищенной воды, полученной из системы водоподготовки.

Автоматизированная система технологического освещения работает по заданному программному алгоритму. Искусственное увеличение продолжительности светового дня для растений до 12 ч (1–3 ч утром до восхода солнца и 1–3 ч вечером после захода) положительно сказывается на их здоровье, росте и развитии. Благодаря дополнительному свету тропические культуры не только хорошо переживают зиму, но и цветут на протяжении всего холодного периода. Главные недостатки системы верхней досветки растений – возможное отключение из-за неудовлетворительного состояния проводки, а также высокие эксплуатационные расходы [8].

В оранжереях применяется декоративная подсветка дорожек с помощью стационарных низковольтных светодиодных светильников, которые устанавливаются вдоль маршрутов движения посетителей и включаются в основном в зимнее время. Для улучшения зрительного восприятия наиболее интересных растений используются переносные светильники.

Сравнительные показатели эффективности систем обеспечения микроклимата в теплицах и оранжереях приведены в таблице.

Анализ данных демонстрирует, что во всех традиционных АСУмк теплиц и оранжерей имеются как преимущества, так и недостатки. Оранжерея представляет собой комплексную динамическую систему, в которой процесс контроля за параметрами окружающей среды и их управления усложняется существенным влиянием внешних метеоусловий.

Таким образом, основной задачей проектирования АСУмк биосферного мембранного шатра является разработка простого и эффективного способа для мониторинга и регистрации показателей микроклимата в среде, подверженной постоянной модификации.

Поиск инновационных решений при проектировании биосферного мембранного шатра

В основе концепции АСУмк должен лежать принцип, согласно которому биосферный мембранный шатёр рассматривается как система с регулируемым микроклиматом, где создаются благоприятные условия в результате эффективного энергообмена между всеми её элементами. При этом физические процессы, протекающие в шатре, направлены в первую очередь на обеспечение цикличности обмена веществ, а также на экономию и рациональное использование энергоресурсов.

Необходимо отметить, что биосферный мембранный шатёр имеет значительную площадь (около 6500 м^2 в анализируемом в настоящей работе варианте исполнения), поэтому климатические параметры в его разных точках могут различаться. Установка одного контрольного датчика в центральной зоне сооружения позволит отследить основную динамику системы, тогда как равномерное распределение датчиков и исполнительных механизмов по всему шатру потребует большого количества кабелей, монтажных материалов и конструкций для их крепления, что усложнит систему и увеличит затраты на её установку и обслуживание. Таким образом, при проектировании количество датчиков и исполнительных механизмов в разных точках строения нужно ограничивать.

Таблица – Сравнительные показатели эффективности систем обеспечения микроклимата в теплицах и оранжереях

Система обеспечения микроклимата	Функция, регулируемый параметр	Исполнительный механизм	Преимущества	Недостатки
Вентиляция, кондиционирование, отопление				
Система обогрева воздуха	Температура воздуха	Электроприводы клапанов	Равномерное регулирование температуры в различных зонах	Затраты на ремонт и эксплуатацию
Система кровельного обогрева	Температура воздуха	Электроприводы клапанов	Увеличение естественной освещённости	Сложность монтажа в верхней зоне
Система почвенного обогрева	Температура почвы	Электроприводы клапанов	Защита от замерзания на определённой глубине	Выделение пара, увеличение относительной влажности воздуха
Система вентиляции	Температура воздуха	Двигатели вентиляторов, электроприводы фрамуг	Равномерное регулирование температуры в различных зонах	Затраты на ремонт и эксплуатацию
Система адиабатического охлаждения	Температура воздуха, относительная влажность воздуха	Двигатели вентиляторов, двигатели циркуляционных насосов	Увеличение влажности, снижение температуры воздуха	Затраты на ремонт и эксплуатацию
Водоснабжение				
Система водоподготовки	Очистка воды от примесей	Мембранные фильтры	Обеспечение высокого качества воды для полива	Засорение фильтров, дорогостоящая замена мембран, влияние на смежные системы
Система туманообразования	Температура воздуха, относительная влажность воздуха	Форсунки распыления	Не создаёт дискомфорта для посетителей и обслуживающего персонала	Затраты на обеспечение высокого качества воды для полива
Система дождевания	Полив растений, относительная влажность воздуха, температура воды	Двигатели насосов, электромагнитные клапаны	Промыв почвы от солей, охлаждение поверхностных слоёв воздуха, высокая интенсивность полива при минимальной продолжительности работы	Затраты при большом расходе воды
Система распределения удобрений	Обеспечение растений питательными веществами	Двигатели насосов, электромагнитные клапаны	Обеспечение необходимой концентрации удобрений, регулирование расхода воды	Затраты на ремонт и эксплуатацию
Освещение				
Система технологического/декоративного искусственного освещения	Уровень освещённости	Светильники	Увеличение освещённости	Затраты на ремонт и эксплуатацию

Альтернативное техническое решение – внедрение беспроводной сенсорной сети, которая может функционировать в широком диапазоне параметров и имеет преимущества по стоимости, мощности, надёжности и мобильности. Быстрое развитие индустрии беспроводной связи сделало технологии Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee доступными как для личного, так и для промышленного применения. Они позволяют создавать масштабные сети и устройства с низким энергопотреблением, способные долгое время работать от бюджетных батарей [5].

АСУмк биосферного мембранного шатра, построенная на основе беспроводных технологий, должна обеспечивать выполнение следующих технических требований:

- применение типовых узлов, количество которых определяется в зависимости от конфигурации и габаритов сооружения;
- контроль минимального числа ключевых параметров микроклимата и возможность добавления новых по мере необходимости;
- низкое энергопотребление;
- оптимизация количества кабельных соединений для упрощения и удешевления монтажа и технического обслуживания;
- наличие как минимум трёх основных элементов: сенсорная станция (блок датчиков), координационная станция (блок исполнительных механизмов и маршрутизатор), центральная станция (блок управления).

Сенсорная станция представляет собой узел сбора климатических параметров: температуры и относительной влажности воздуха, концентрации CO_2, освещённости, а также температуры и влажности почвы – в виде показаний первичных датчиков. Сенсорная станция отправляет данные на координационную станцию через беспроводной модуль.

Координационная станция выполняет функцию маршрутизатора, контролирует поток информации между сенсорной и центральной станциями заранее запрограммированным образом. Кроме того, она управляет исполнительными механизмами, количество которых может быть дополнено по мере необходимости. К минимальному набору таких механизмов относятся двигатели насосов, вентиляторов, приводы фрамуг, светильники.

Центральная станция является узлом управления всей системы микроклимата: анализирует сведения, полученные с датчиков, даёт указания координационной станции, хранит и отображает информацию в режиме реального времени. Связь между центральной и координационной станциями обеспечивается посредством беспроводного модема дальнего действия.

Отдельный элемент – метеостанция, предназначенная для мониторинга метеорологической обстановки, долгосрочного исследования экологических параметров, прогнозирования неблагоприятных погодных условий и стихийных бедствий (шторм, пожар, наводнение) (рисунок 9).

Рисунок 9 – Профессиональная метеостанция IMETEOLABS PWS-800 [9]

На этапе структурирования АСУмк биосферного мембранного шатра определяются её архитектура и функциональные требования к основным элементам (рисунок 10).

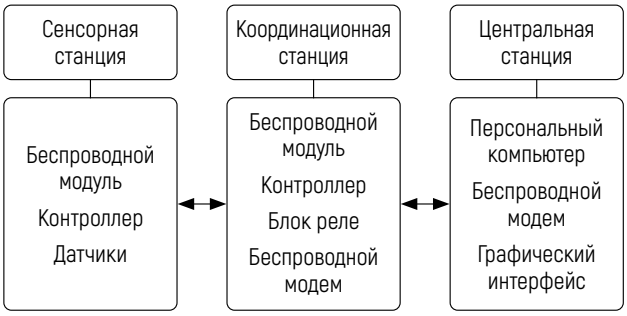


Рисунок 10 – Структурная схема АСУмк биосферного мембранного шатра

Сенсорная станция должна поддерживать возможность получать запрос от центральной станции на сбор данных с датчиков, измерять параметры микроклимата, выполнять преобразование имеющейся информации и отправлять её на координационную станцию.

Координационная станция должна принимать запрос и указания от центральной станции, анализировать пакет инструкций, передавать на сенсорную станцию алгоритм действий и сигнал на активацию исполнительных механизмов.

Центральная станция должна отправлять запрос на сбор показателей, а также управляющие инструкции на координационную станцию, осуществлять обработку, хранение и визуализацию информации в режиме реального времени с помощью надёжного пользовательского интерфейса [10].

Указанные функциональные требования к основным элементам АСУмк биосферного мембранного шатра позволяют обозначить минимальный состав каждого узла управления.

Сенсорная станция состоит из двух блоков (сенсорный и обработки данных), расположенных в одном корпусе и соединённых между собой внутренней шиной.

Сенсорный блок включает в себя источник питания, беспроводной модуль и датчики следующих параметров:

- температура и влажность воздуха;
- освещённость;
- концентрация CO_2;
- температура почвы;
- влажность почвы.

Блок обработки данных представляет собой контроллер, источник питания и схему определения уровня заряда батареи.

Датчики, которые используются в биосферном мембранном шатре, можно разделить на две категории (в зависимости от типа данных, передаваемых в блок обработки): цифровые и аналоговые.

Важный параметр при выборе оборудования сенсорной станции – потребляемая мощность. Сенсорная станция должна иметь низкое энергопотребление, быть малогабаритной и компактной. Для удовлетворения указанным условиям необходим портативный аккумулятор, который является главным источником питания сенсорной станции.

Благодаря развитию технологий значительно уменьшаются размеры датчиков (рисунок 11). Это позволяет конфигурировать сети и успешно их применять в промышленности и сельском хозяйстве. Выбор типов датчиков определяется на основе анализа таких характеристик, как быстродействие, диапазон измерений, энергопотребление, размер, способ передачи данных, стоимость [11].

Координационная станция состоит из следующих элементов: контроллер, источник питания, беспроводной модуль, беспроводной модем, релейный блок.

Блок реле управления исполнительными механизмами даёт возможность контролировать локальные действия. Для данной задачи можно использовать плату релейных выходов, состоящую из нормально разомкнутых и нормально замкнутых контактов.

Рисунок 11 – Основные типы датчиков, применяемых в оранжереях

Блок-схема, описывающая принцип управления исполнительными механизмами в биосферном мембранном шатре, представлена на рисунке 12.

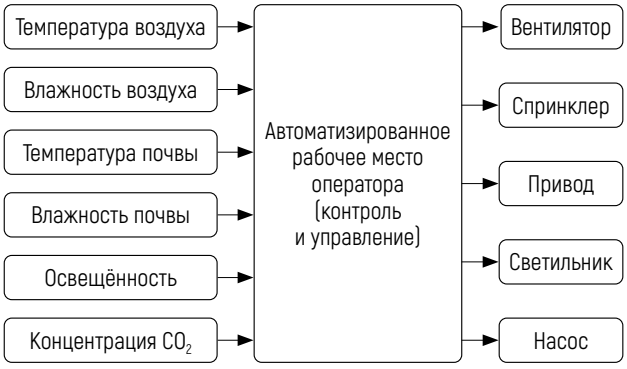


Рисунок 12 – Схема управления исполнительными механизмами в биосферном мембранном шатре

Центральная станция выступает основным контроллером системы и представляет собой персональный компьютер и беспроводной модем.

К ключевым функциям графического интерфейса оператора относятся мониторинг в режиме реального времени, построение графиков и архивация полученной информации.

Важный элемент центральной станции – персональный компьютер, который отвечает за сбор, обработку и представление данных. Технические характеристики

для выбора типа персонального компьютера – быстродействие и функциональность. Для визуализации данных необходим простой, доступный и интуитивно понятный графический пользовательский интерфейс, который должен предусматривать ручной и автоматический режимы управления.

В ручном режиме оператор может сам отправлять команды на станции, управлять исполнительными механизмами и контролировать их состояние. В автоматическом режиме система действует по заранее определённому алгоритму. В зависимости от способа управления оператору требуется установить пороговый уровень безопасности для каждого климатического параметра.

В автоматическом режиме система круглосуточно следит за микроклиматом, активирует исполнительные механизмы при отклонении безопасных порогов для восстановления оптимальных показателей и обеспечивает постоянное оповещение пользователя об условиях внутри шатра. Кроме того, в системе создаётся архивная база данных, которая нужна для проведения аналитики и научных исследований с целью выявления необходимых параметров микроклимата и оценки энергоэффективности [11].

Для определения минимального количества сенсорных и координационных станций в составе АСУмк биосферного мембранного шатра важна проектная проработка, которая также даст возможность обозначить места их оптимальной установки. Расчётное моделирование процессов в биосферном мембранном шатре позволит сформировать технические требования перед началом процесса проектирования.

Для беспроводной передачи данных между станциями применяются такие элементы, как беспроводной модуль и беспроводной модем дальнего действия (рисунок 13).

ZigBee – стандарт радиочастотной связи, основанный на IEEE 802.15.4; технология ближнего радиуса действия, представляющая собой беспроводную сенсорную сеть, которая отличается надёжностью, безопасностью и достаточной скоростью передачи данных, быстродействием, низким энергопотреблением и невысокой стоимостью [10].

Несмотря на существенные первоначальные инвестиционные затраты на проектирование и монтаж систем автоматизации, внедрение такого оснащения приводит к экономии энергоресурсов и значительному сокращению накладных расходов. По информации, приведённой в [12], при функционировании систем автоматизации в теплицах зафиксировано уменьшение производственных затрат на 65 %, потребления электроэнергии на 40 % и оросительной воды на 30 %, использования удобрений на 30 %, а также в целом общих затрат на 70 %.

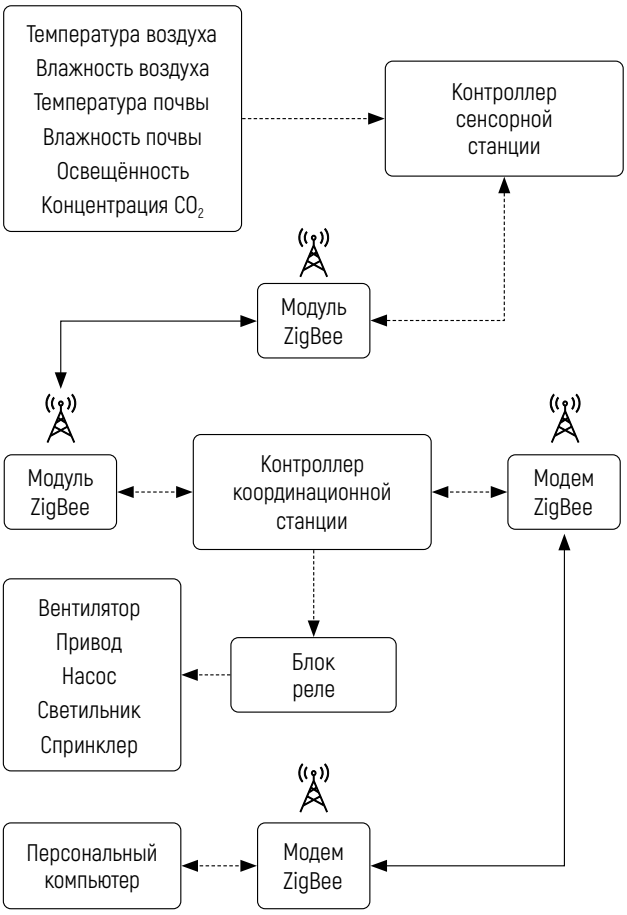


Рисунок 13 – Структурная схема передачи данных в АСУмк биосферного мембранного шатра

Заключение

В настоящем исследовании выделены критически важные и вспомогательные технологические процессы, протекающие в биосферном мембранном шатре, их входные и выходные параметры на этапе проектирования.

Рассмотрена разработка АСУмк на основе беспроводных сенсорных узлов. Беспроводная сеть, состоящая из небольших сенсорных блоков, которые оснащены радиосвязью и несколькими датчиками, является перспективным и экономически эффективным вариантом построения системы регулирования и мониторинга микроклимата, тогда как проводные решения, подразумевающие прокладку кабелей, делают систему дорогой и уязвимой, а также ограничивают возможность переноса точек измерения после установки и монтажа.

Целесообразность предложенного подхода может быть проверена путём дальнейшего развёртывания простой

сенсорной сети в теплицах на территории Крестьянского фермерского хозяйства «Юницкого». В ходе проведения эксперимента планируется собрать реальные данные для оценки надёжности работы сети и её способности обнаруживать слои микроклимата в разных зонах. Это позволит проанализировать локальные различия, вызванные внешними факторами, и послужит основой для понимания особенностей энергетических процессов, протекающих в подобных объектах, с целью их оптимизации.

Представленная АСУмк биосферного мембранного шатра обладает такими преимуществами, как портативность, простота в использовании, масштабируемость, мобильность и энергоэффективность. Отличительной характеристикой данной системы является то, что высокая степень автоматизации не исключает непосредственного участия человека в технологических процессах. Это приобретает особую значимость в перспективе применения АСУмк биосферного мембранного шатра как одного из элементов ЭКД в рамках строительства космического индустриального ожерелья «Орбита». Имитационное моделирование обитаемого пространства позволит учесть все возможные параметры и в будущем создать среду для полноценного существования и созидательной деятельности человека в космосе.

Список основных источников

1. *Юницкий, А.Э. ЭкоКосмоДом как пространство для сохранения видового разнообразия тропической и субтропической флоры / А.Э. Юницкий, В.К. Павловский, Д.В. Феофанов // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 153–157.*
2. *Юницкий, А.Э. Программа «ЭкоМир» / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 24–77.*
3. *Юницкий, А.Э. Моделирование закрытого биосферного пространства в шатре со светопрозрачным плёночным покрытием / А.Э. Юницкий, М.М. Давыдик // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 388–403.*
4. *Karaman, S. Automation Applications in Greenhouse / S. Karaman, S. Yazarel, Z. Gokalp // Current Trends in Natural Sciences. – 2019. – Vol. 8, iss. 16. – P. 154–159.*
5. *Vu, Q.M. Automated Wireless Greenhouse Management System: A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Electronics and Computer Systems / Vu Quan Minh; Massey University, School of Engineering and Advanced Technology. – Palmerston North, 2011. – 156 l.*
6. *Маскалев, А.С. Автоматизация системы управления микроклимата в оранжерее / А.С. Маскалев // Наука и образование сегодня. – 2017. – № 7 (18). – С. 25–28.*
7. *Послянова, А. Ботанический сад СПбГУ хотят сделать публичным / А. Послянова // KP.RU. – URL: https://www.spb.kp.ru/daily/27100/4174052/. – Дата публ.: 05.03.2020.*
8. *Золкин, С.Ю. Автоматизация технологических систем управления в крупных оранжереях – преимущества и недостатки, влияние на развитие растений / С.Ю. Золкин // Ботанические сады как центры изучения и сохранения фиторазнообразия: тр. междунар. науч. конф., посвящ. 140-летию Сибир. ботан. сада Томск. гос. ун-та, Томск, 28–30 сент. 2020 г. – Томск, 2020. – С. 81–83.*
9. *Профессиональные стационарные и мобильные метеостанции // ICBcom. – URL: https://icbcom.ru/ru/product-category/meteooborudovanie/professionalnye-statsionarnye-i-mobilnye-meteostantsii/ (дата обращения: 27.02.2025).*
10. *Greenhouse Management Using Embedded System and Zigbee Technology / S. Thenmozhi, M.M. Dhivya, R. Sudharsan, K. Nirmalakumari // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2014. – Vol. 3, iss. 2. – P. 7382–7389.*
11. *A Review of Wireless Sensors and Networks' Applications in Agriculture / A.-ur-Rehman, A.Z. Abbasi, N. Islam, Z.A. Shaikh // Computer Standards & Interfaces. – 2014. – Vol. 36, iss. 2. – P. 263–270.*
12. *Enokela, J. An Automation Greenhouse Control System Using Arduino Prototyping Platform / J. Enokela, T.O. Othoigbe // ResearchGate. – URL: https://www.researchgate.net/publication/274890807_An_Automated_Greenhouse_Control_System_Using_Arduino_Prototyping_Platform (дата обращения: 10.12.2024).*

УДК 004.9+629.7

Информационные технологии для управления ресурсами в ближнем космосе: вызовы и решения

Е.В. Новицкая

ЗАО «Струнные технологии»,
г. Минск, Беларусь

Проанализированы существующие и разрабатываемые информационные технологии для оптимизации логистических, производственных и жизнеобеспечивающих процессов в ближнем космосе, в том числе в космическом индустриальном ожерелье «Орбита» (КИО «Орбита»).

Описаны основные векторы развития данной области, включая использование искусственного интеллекта, автоматизированных систем управления и космических дронов. Приведены примеры проектов и технологий, таких как многоразовые ракеты, космические роботы, виртуальные помощники для экипажа, 3D-печать в условиях невесомости и автономные биосистемы жизнеобеспечения. Особое внимание уделено КИО «Орбита» как перспективной платформе для экспансии земной цивилизации в космос, а также для логистики, производства и жизни на орбите. Кроме того, затронуты вопросы кибербезопасности, автономности систем и роли цифрового моделирования. Предложены практические решения, направленные на повышение эффективности и устойчивости процессов в космической инфраструктуре.

Ключевые слова:
ближний космос, информационные технологии, искусственный интеллект, КИО «Орбита», распределение ресурсов.

UDC 004.9+629.7

Information Technologies for Resource Management in Near Space: Challenges and Solutions

E. Novitskaya

Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

The study analyzes existing and emerging information technologies aimed at optimizing logistics, production, and life-support processes in near space, including the Industrial Space Necklace "Orbit" (ISN "Orbit").

The key directions of development in this field comprise the integration of artificial intelligence, automated control systems, and space drones. Examples of relevant projects and technologies include reusable launch vehicles, space robotics, virtual crew assistants, 3D printing in microgravity, and autonomous biosystems for life support. Special attention is given to the ISN "Orbit" as a promising platform for the expansion of Earth's civilization into space, as well as for logistics, manufacturing, and orbital habitation. The study also addresses issues of cybersecurity, system autonomy, and the growing importance of digital modeling. Practical solutions are provided to enhance the efficiency, reliability, and sustainability of processes within space infrastructure.

Keywords:
artificial intelligence,
Industrial Space Necklace "Orbit" (ISN "Orbit"),
information technologies,
near space,
resource allocation.

Введение

Информационные технологии играют всё более важную роль в управлении ресурсами, особенно в контексте освоения ближнего космоса. Мировые тенденции показывают усиление интереса к исследованиям в этой области, а также растущую необходимость эффективного преодоления возникающих проблем.

Одним из ключевых вопросов в условиях космической среды является нехватка точных и оперативных данных для принятия решений. Актуальность применения здесь искусственного интеллекта (ИИ) вызвана его возможностями для анализа информации, прогнозирования ситуаций и выбора оптимальных стратегий. Интеграция ИИ в технологические процессы позволяет эффективно распоряжаться ресурсами в ближнем космосе, минимизировать риски и повышать эффективность космических миссий.

Цель настоящей работы – изучить существующие и перспективные информационные технологии, способствующие оптимизации логистических, производственных и жизнеобеспечивающих процессов в ближнем космосе, а также предложить практические инструменты для проекта космического индустриального ожерелья «Орбита» (КИО «Орбита»). Особое внимание уделено инновационным подходам в данной сфере: использованию ИИ, автоматизированных систем управления и дронов для мониторинга и распределения ресурсов. Статья представляет собой всесторонний обзор соответствующих информационных технологий с акцентом на ключевые вызовы и пути их преодоления. Поставлены задачи по анализу актуальных решений, оценке их эффективности и формированию стратегий оптимизации управления в условиях ограниченности ресурсов и высокой степени неопределённости. Исследование закладывает основу для дальнейших разработок, обеспечивая научно-практическую базу для развития технологий космического менеджмента.

Роль искусственного интеллекта в аэрокосмической отрасли

Рост цифровизации стимулирует расширение рынка ИИ-технологий, применяемых в различных видах транспорта. ИИ оказывает существенное влияние также на аэрокосмическую отрасль за счёт интеграции в системы мониторинга полётов и создания виртуальных ассистентов для взаимодействия с экипажем.

Использование ИИ, автоматизированных систем и космических дронов открывает новые возможности для эффективного управления ресурсами в ближнем космосе. Активная эксплуатация дронов с функциями анализа данных остаётся одной из важных тенденций в области первичного сбора и обработки информации. Такие устройства способны выполнять полёты в ближнем космосе, преимущественно в стратосфере (20–30 км), где успешно действуют солнечные платформы HAPS. В качестве примеров стоит привести китайский прототип с размахом крыла 40 м, совершивший первый полёт на высоте 20 км, и Zephyr S от Airbus, работавший 36 суток на высоте 23 км. В более высоких слоях (50–90 км) возможны лишь кратковременные импульсные полёты, а на орбите дроны заменяются орбитальными роботами.

Ключевыми технологиями, которые помогают интегрировать ИИ в аэрокосмическую сферу, являются алгоритмы машинного обучения, распознавание изображений и обработка естественного языка. Внедрение ИИ продолжится; ожидается, что его рынок будет значительно расти в ближайшие годы [1]. Прогноз, основанный на анализе данных, показывает, что объём рынка ИИ в аэрокосмической отрасли в период с 2024 по 2029 г. увеличится на 7,24 млрд USD, при этом среднегодовой темп роста составит 45,9 % (рисунок 1) [1].

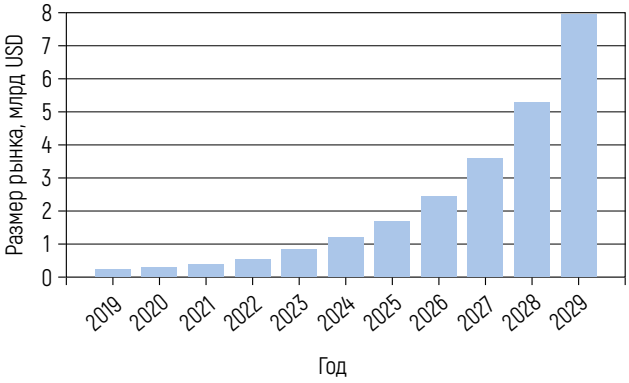


Рисунок 1 – Размер рынка ИИ в аэрокосмической отрасли (факт и прогноз)

В то же время вопросы безопасности и конфиденциальности данных остаются серьёзными вызовами, требующими принятия эффективных мер кибербезопасности.

Многоразовые космические системы

Современная наука и технологии постоянно открывают перед человечеством новые горизонты и возможности. Российская космическая отрасль с богатым наследием

советской космонавтики создаёт собственные многоразовые космические системы. Стоит отметить, что и в Беларуси ведётся разработка трёх космических программ [2].

К числу инженерных проектов мирового уровня относятся космический аппарат «Амур-СПГ», который стал первой ракетой многократного использования; многоразовый космический корабль «Орёл», предназначенный для пилотируемых полётов и миссий на Луну; ракета Falcon 9 от SpaceX, которая достигла рекордного количества запусков одной и той же ступени – 26 стартов за февраль 2025 г. [3]. При этом среди концептуальных решений в сфере освоения ближнего космоса особого внимания заслуживает общепланетарное транспортное средство (ОТС), разработанное инженером А.Э. Юницким [4].

Именно запуск ОТС, рассматриваемый как потенциальная отправная точка практической индустриализации околоземного пространства, должен стать первым шагом к созданию КИО «Орбита» – транспортно-инфраструктурного и индустриально-жилого комплекса, опоясывающего Землю по экватору на низкой круговой орбите (около 400 км) и выполняющего роль функционального аналога экваториального линейного города [5].

Робототехника в космосе

В настоящее время значительное внимание учёных уделяется развитию робототехники. Один из наиболее известных проектов российских изобретателей – человекоподобный робот «Теледроид», который является улучшенной версией знаменитого робота «Фёдора». «Теледроид» способен выполнять сложные операции в открытом космосе как в режиме аватара, повторяя движения оператора, так и автономно, исходя из предварительно заданных алгоритмов.

На Международной космической станции (МКС) тестируются виртуальные ассистенты. Примеры таких испытаний – применение платформы DialogOS и виртуального помощника «Лучик» на корабельных компьютерных системах российского сегмента МКС. Демонстрационный виртуальный ассистент может вести диалог с космонавтом на различные темы, а также записывать и хранить аудиоответы для последующего изучения и анализа на Земле [3].

Технологии 3D-печати в космосе

3D-печать активно трансформирует космическую отрасль, позволяя создавать необходимые детали прямо на орбите. Так, на МКС успешно функционирует 3D-принтер Томского государственного университета, разработанный совместно с корпорацией «Роскосмос». Международные проекты также демонстрируют прогресс: ICON (США) и NASA тестируют лунный строительный комплекс, Китай готовит миссию Chang'e-8 с возможностью печати на Луне, а Европейское космическое агентство (ESA) изучает первую металлическую деталь, сделанную в невесомости. Одновременно развиваются автономные системы жизнеобеспечения для длительных миссий без поставок с Земли [3].

Предприятие группы компаний Юницкого «СВ ПЛАНТ» (г. Минск, Беларусь) активно использует технологии 3D-печати для разработки основных элементов транспортно-инфраструктурных комплексов uST, создавая прототипы, мастер-модели и готовые детали. На 3D-принтерах Formlabs Form 2, Ultimaker S5 и FlashForge Guider IIs здесь изготавливают изделия различного размера. Ручной 3D-сканер Shining EinScan-Pro+ даёт возможность контролировать точность деталей и выполнять реверсивный инжиниринг, при котором изделия или их совокупность как устройство подвергаются измерениям и съёму параметров для получения массива данных, позволяющих производить такие объекты либо создавать новые детали и устройства, изменённые и усовершенствованные по сравнению с оригиналом (рисунок 2). Подобный опыт применения технологии 3D-печати в создании сложных конструкций имеет перспективное значение для космической отрасли.

Рисунок 2 – Использование 3D-печати в ООО «СВ ПЛАНТ» [6]

3D-печать на этапе проектирования ускоряет проверку инженерных решений, снижает издержки и минимизирует риск брака при запуске серийного производства [6].

Автономные системы жизнеобеспечения и космическое земледелие

Создание полностью автономных систем жизнеобеспечения стало ключевым вызовом современной космонавтики. Они должны предоставлять экипажу воздух, воду и пищу без постоянных поставок с Земли, что критически важно для долгосрочных миссий на Луну, Марс и планеты за пределами земной группы.

Замкнутые экосистемы – одно из самых перспективных направлений космических исследований. ESA разрабатывает проект MELiSSA – искусственную биосферу, в которой микроорганизмы и растения превращают отходы в кислород и пищу. Система включает пять этапов и обеспечивает почти полный цикл регенерации.

Космическое земледелие также активно развивается: на МКС уже выращивали салат, редис, пшеницу и перец. Проекты Veggie, Lunar Greenhouse (США) и «Лада» (Россия) доказали возможность получения урожая в условиях невесомости и на Луне.

Учёные создают энергоэффективные автономные системы. Подобные технологии планируется внедрить и на новой российской орбитальной станции. Они могут использоваться не только в межпланетных миссиях, но и на Земле, предлагая устойчивые решения в сфере экологии [3].

В рамках развития замкнутых экосистем перспективные исследования проводятся и в ЗАО «Струнные технологии» (г. Минск, Беларусь). В частности, предложено применение микроводоросли *Chlorella vulgaris* для повышения эффективности перепеловодства в ЭкоКосмоДоме (ЭКД) – биорегенеративной среде, моделирующей автономную жизнь вне Земли. Хлорелла, обладая высоким содержанием белка и способностью очищать воду и воздух, включается в пищевые и санитарные циклы, содействуя устойчивости замкнутой экосистемы (рисунок 3) [4].

Кроме того, в компании разрабатывается проект замкнутой экосистемы uBioSystem (рисунок 4), предназначенной для длительного существования сообщества живых организмов. Система включает дополнительные технологические процессы, обеспечивающие удовлетворение её потребностей, и представляет собой модель окружающей среды с полностью замкнутыми циклами веществ во внутреннем пространстве [7].

Рисунок 3 – Экспериментальная установка по выращиванию хлореллы:
1 – контейнер с ёмкостями; 2 – газовый баллон;
3 – шкаф управления; 4, 5 – крышки [4]

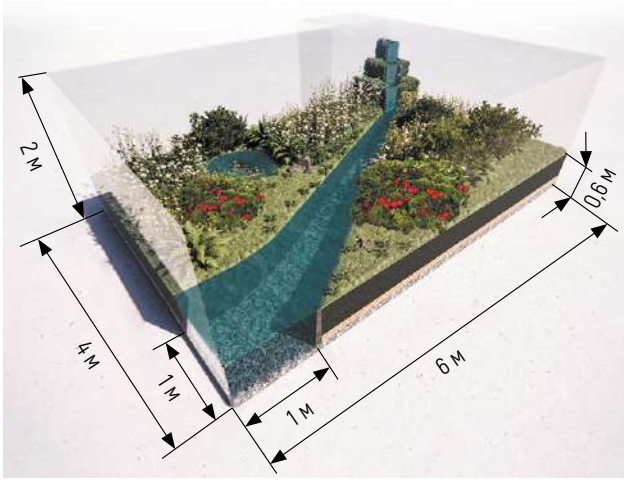


Рисунок 4 – uBioSystem (визуализация) [7]

Ежегодно в рамках конференции по индустриализации ближнего космоса, организаторами которой являются белорусские компании «Астроинженерные технологии» и «Струнные технологии», рассматриваются главные аспекты освоения околоземного пространства:

- создание ОТС – системы доставки грузов и людей на орбиту с помощью экологичной электрической энергии вместо традиционных ракет;

• строительство КИО «Орбита» – сети модульных платформ с промышленной и экологической функциями (включая ЭКД);

• отказ от ископаемого топлива – переход на солнечную энергетику в космосе как шаг к «зелёной» индустриализации;

• снижение затрат – расчётная эффективность доставки полезной нагрузки посредством ОТС в 1000 раз выше, чем ракетами;

• глобальный гуманитарный смысл – обеспечение выживания человечества, экологическая безопасность и массовая доступность космической среды.

Особое внимание уделяется проекту КИО «Орбита», который предложен как альтернатива ракетным технологиям и ориентирован на создание постоянной орбитальной инфраструктуры.

КИО «Орбита» как модель освоения ближнего космоса

Внедрение ИИ значительно ускорит и повысит эффективность освоения ближнего космоса за счёт оптимизации траекторий доставки, автономного управления орбитальными модулями, интеллектуального управления солнечными энергетическими системами и прогнозирования рисков. Кроме того, ИИ осуществляет мониторинг космического мусора, снижает затраты через анализ больших данных, повышает автономность систем в условиях ограниченной связи с Землёй и расширяет доступ к космическим ресурсам, делая освоение космоса более безопасным, устойчивым и масштабируемым.

На основании вышеизложенного предлагается интеграция ИИ в экосистему КИО «Орбита», представляющего собой высокотехнологичную платформу, способную реализовать логистику, производство, жизнеобеспечение и безопасность в околоземном пространстве (рисунок 5) [8].

Рисунок 5 – КИО «Орбита» (вариант) [8]

Ключевая особенность проекта – объединение различных информационных и управляющих систем для эффективного распределения ресурсов, устойчивого функционирования узловых элементов комплекса и защиты от внешних угроз, таких как метеориты. Благодаря всестороннему подходу к информационному обеспечению и цифровому моделированию, КИО «Орбита» может стать базовым компонентом новой космической инфраструктуры Земли. В контексте воплощения подобных масштабных объектов особую значимость приобретают информационные технологии, подразумевающие:

• распределённое управление ресурсами (энергия, вода, воздух, материалы, трафик) в режиме реального времени;

• интеграцию цифровых двойников каждого модуля комплекса для прогноза технического состояния и планирования технического обслуживания;

• применение ИИ для анализа угроз и сценариев реагирования (например, при космических ударах);

• использование блокчейн-технологий для надёжного управления доступом, логистикой и цепочками поставок внутри комплекса;

• создание унифицированной среды управления данными между орбитальными и наземными центрами;

• внедрение стандартов автономного самоуправления для изолированных узлов при потере связи с управляющим центром.

Задействование современных информационных технологий в проектах, подобных КИО «Орбита», позволит не только повысить надёжность и автономность функционирования орбитальных комплексов, но и выстроить универсальную цифровую инфраструктуру, способную адаптироваться к задачам как освоения ближнего космоса, так и защиты планеты от внешних угроз. Предложенные практические решения формируют основу для построения управляемой, масштабируемой и устойчивой экосистемы космического будущего.

Вызовы, связанные с управлением ресурсами в ближнем космосе

Управление ресурсами в околоземном пространстве сталкивается с рядом комплексных и взаимосвязанных вызовов, преодоление которых требует высокотехнологичных, интегрированных и адаптивных инструментов.

1. В замкнутых космических системах критически важной становится своевременная и точная информация

о состоянии всех подсистем – от энергетики до жизнеобеспечения. Однако существующие сенсорные и телеметрические сети часто не имеют необходимой плотности, надёжности и скорости передачи данных, особенно в условиях ограниченной пропускной способности связи между орбитальными и наземными центрами. Это ведёт к запаздыванию в принятии решений и снижению общей эффективности управления. Для урегулирования проблемы предлагается внедрение интеллектуальной распределённой сети сенсоров с локальной обработкой данных и адаптивной передачей информации в реальном времени.

2. Космическая инфраструктура подвержена множеству факторов риска: воздействию радиации, экстремальным температурным перепадам, микрометероидной эрозии, износу оборудования. Даже незначительная поломка в замкнутой системе способна повлечь каскадный эффект. А поскольку техобслуживание затруднено или невозможно в ручном режиме, необходима высокая степень автоматизации мониторинга и предиктивной диагностики.

3. По мере цифровизации космические системы становятся уязвимыми для кибератак. Нарушение логики управления, перехват команд или вмешательство в работу критически важных модулей может привести к катастрофическим последствиям. Угроза возрастает для децентрализованных и распределённых систем, где множество узлов взаимодействует без постоянного контроля с Земли. Это требует внедрения защищённых протоколов, криптографических технологий и средств киберустойчивости, адаптированных к условиям космоса.

4. Ограниченность связи, задержка сигнала и физическая недоступность вмешательства человека вынуждают проектировать системы, функционирующие автономно в течение длительного времени. Это особенно важно для модулей жизнеобеспечения, энергообеспечения, а также для транспортных и научных блоков. Следовательно, необходимо использование ИИ-алгоритмов, способных не только реагировать на нештатные ситуации, но и адаптироваться к новым условиям.

Преодоление вышеуказанных барьеров возможно только при наличии системного подхода к цифровизации космической среды, что включает:

- развитие распределённых сетей сенсоров и цифровых двойников;
- интеграцию интеллектуальных алгоритмов для предиктивного анализа и самодиагностики;
- создание отказоустойчивой архитектуры управления;
- применение современных средств киберзащиты и автономного принятия решений.

Таким образом, существенное значение приобретает тесная связка информационных технологий с инженерными и биотехническими компонентами, обеспечивающая целостность, устойчивость и адаптивность орбитальных комплексов, таких как КИО «Орбита».

Интеграция искусственного интеллекта в КИО «Орбита»

Применение ИИ для построения цифровых двойников орбитальных модулей, например КИО «Орбита», позволит прогнозировать техническое состояние оборудования, автоматизировать его обслуживание и предотвращать потенциальные аварии [4, 5]. В автономной экосистеме, такой как MELiSSA, ИИ координирует циклы переработки отходов, воды, кислорода и пищевых ресурсов, минимизируя необходимость вмешательства человека. NASA активно описывает применение ИИ в автономных системах жизнеобеспечения [9]. Хотя в текущей архитектуре КИО «Орбита» интеграция ИИ прямо не предусмотрена, именно его внедрение способно значительно повысить эффективность управления ресурсами и функционирования подобных комплексов. Слияние возможностей ИИ с инфраструктурной мощностью КИО «Орбита» откроет новые горизонты для создания адаптивных, саморегулируемых и устойчивых систем.

Важную роль также играют космические дроны, которые с помощью ИИ-алгоритмов осуществляют мониторинг внешних конструкций орбитальных станций, распределяют грузы и собирают первичную информацию о техническом состоянии оборудования [10]. Кроме того, принимать решения, вести диалоги и выполнять повседневные задачи в условиях изоляции экипажу помогают виртуальные ассистенты, такие как «Лучик», работающие на основе технологий машинного обучения.

Для того чтобы повысить общую эффективность управления ресурсами в космической среде, предлагается ряд практических инструментов:

- интеграция нейросетей в модули жизнеобеспечения предоставит возможность анализировать климатические и биологические параметры в реальном времени и динамически адаптировать внутреннюю среду под нужды экипажа;
- реализация распределённого управления ресурсами с использованием блокчейн-технологий и ИИ обусловит

надёжное регулирование доступа, логистики и потребления энергии;

• внедрение в критических ситуациях ИИ-моделей позволит симулировать различные аварийные сценарии и формировать оптимальные алгоритмы реагирования;

• разработка многофункциональных дронов, обладающих возможностями не только мониторинга, но и мелкого ремонта, доставки грузов и сбора проб, усилит оперативную поддержку орбитальных объектов;

• программирование узлов космической инфраструктуры, предполагающее применение встроенных ИИ-протоколов безопасности, обеспечит автономное поведение и принятие решений в режиме полной изоляции в случае потери связи с управляющим центром.

Эти технологические инструменты формируют фундамент для создания устойчивых, самоуправляемых и адаптивных систем, гарантирующих надёжное функционирование космических комплексов в долгосрочной перспективе.

Блок-схема, представленная на рисунке 6, визуализирует внедрение ИИ в КИО «Орбита», учитывая три ключевые характеристики данного комплекса: его статус как мегаструктурного объекта, охватывающего Землю по экватору, его предназначение обслуживать человечество из космоса, а также выступать в качестве основы для дальнейшей экспансии в космос и платформы для защиты планеты от космических угроз, в том числе метеоритных.

Схема отражает интеграцию ИИ в инфраструктуру КИО «Орбита», где он не только регулирует ключевые функции, но и развивается за счёт обратной связи от процессов, что обеспечивает адаптивность и устойчивость системы [4, 5]. Двусторонние стрелки отражают взаимное влияние между ИИ и различными направлениями деятельности: ИИ не только модерирует, но и обучается исходя из получаемых сведений. Стрелки, идущие к ИИ, показывают, что данные операции формируют информационные потоки и задачи, подлежащие его анализу и обработке. Единственная стрелка от ИИ демонстрирует, что он целенаправленно воздействует на оптимизацию процессов управления, повышая эффективность использования ресурсов и комфорт проживания.

ИИ является основой архитектуры управления комплексом, реализуя его автономную, надёжную и скоординированную работу; берёт на себя автоматизацию главных функций – от дистанционного обслуживания модулей до самодиагностики оборудования. Среди регулируемых процессов – жизнеобеспечение, распределение ресурсов, поддержание термического баланса, а также прогнозирование потребностей и организация снабжения без участия человека. Кроме того, ИИ руководит транспортной и производственной инфраструктурой, контролирует движение орбитальных лифтов, шаттлов, грузовых контейнеров, оптимизирует логистику персонала и материалов, а также отвечает за своевременное техническое обслуживание промышленных узлов.

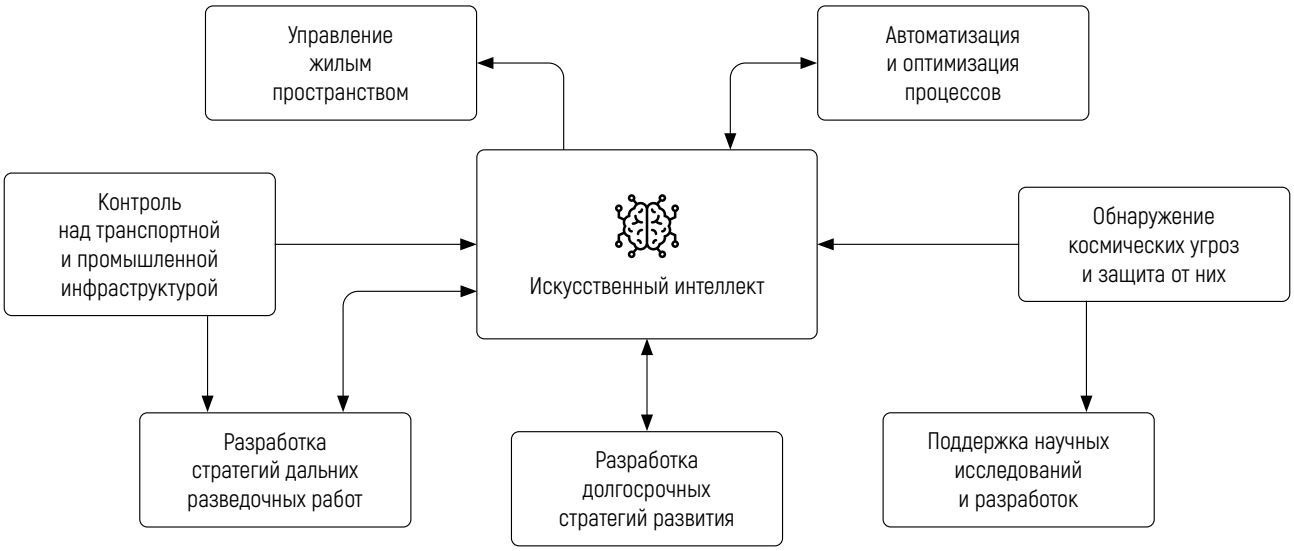


Рисунок 6 – Внедрение ИИ в КИО «Орбита»

В жилых секциях КИО «Орбита» может быть реализована интеллектуальная система комфорта – «умный дом», адаптирующий среду под биоритмы и привычки обитателей. Такая система способна:

- осуществлять автоматическую настройку климата, освещения и вентиляции;
- идентифицировать голосовые и жестовые команды для управления бытовыми функциями;
- отслеживать потребление энергии;
- контролировать уровень переработки отходов;
- взаимодействовать с охранными и медицинскими подсистемами;
- учитывать индивидуальные предпочтения и расписание жильцов.

Благодаря такому подходу достигается высокий уровень комфорта, безопасности и автономности проживания на орбите. Дополнительно ИИ регулирует внутренние условия обитаемых модулей и эффективно распределяет пространства между жилыми и рабочими зонами. Все параметры среды гибко подстраиваются под реальные потребности экипажа, что способствует устойчивому и эргономичному функционированию комплекса в долгосрочной перспективе.

Будущее освоения космоса с помощью искусственного интеллекта

Одной из важных функций, которые планируется возложить на ИИ, станет защита КИО «Орбита» от космических угроз. Проект предусматривает круглосуточный мониторинг орбитального пространства, автоматическое распознавание опасных объектов – метеороидов и техногенного мусора – и дальнейшее управление системой активной обороны. Последняя включит упреждающие манёвры и при необходимости применит специализированные средства защиты (лазерные либо плазменные установки).

В перспективе ИИ должен играть ведущую роль в планировании и реализации миссий дальнего космоса. Предполагается, что алгоритмы будут моделировать экспедиции за пределы Луны и Марса, оценивать потенциальные зоны добычи ресурсов и участвовать в формировании решений для создания автономных внесолнечных колоний.

Не менее важной станет поддержка научно-исследовательских работ: ИИ начнёт анализировать телеметрию и результаты экспериментов в реальном времени, планировать их проведение и управлять автоматизированными лабораториями с двусторонней связью с земными центрами.

С учётом масштабности и автономного характера КИО «Орбита» функционирование данного комплекса без интеллектуальных систем практически невозможно. Заложенная концепция рассматривает ИИ как центральную нервную систему, которая в будущем обеспечит синхронизацию процессов, безопасность и устойчивое развитие всей инфраструктуры.

Таким образом, реализация описанных ИИ-решений позволит превратить КИО «Орбита» из инженерного проекта в самообучающуюся, адаптивную экосистему, открывающую путь к звёздам и формирующую новую модель устойчивого освоения ближнего космоса с упором на автономность, интеллектуальное управление и готовность к внезапным внешним воздействиям.

Заключение

Развитие информационных технологий открывает качественно новые возможности для эффективного распоряжения ресурсами в ближнем космосе. Применение ИИ, автоматизированных систем управления, дронов и цифрового моделирования позволяет не только повысить точность и скорость принятия решений, но и значительно сократить зависимость от земной поддержки. В условиях ограниченности ресурсов, удалённости и существенной степени риска такие технологии становятся критически важными для устойчивого функционирования орбитальных комплексов и пилотируемых миссий.

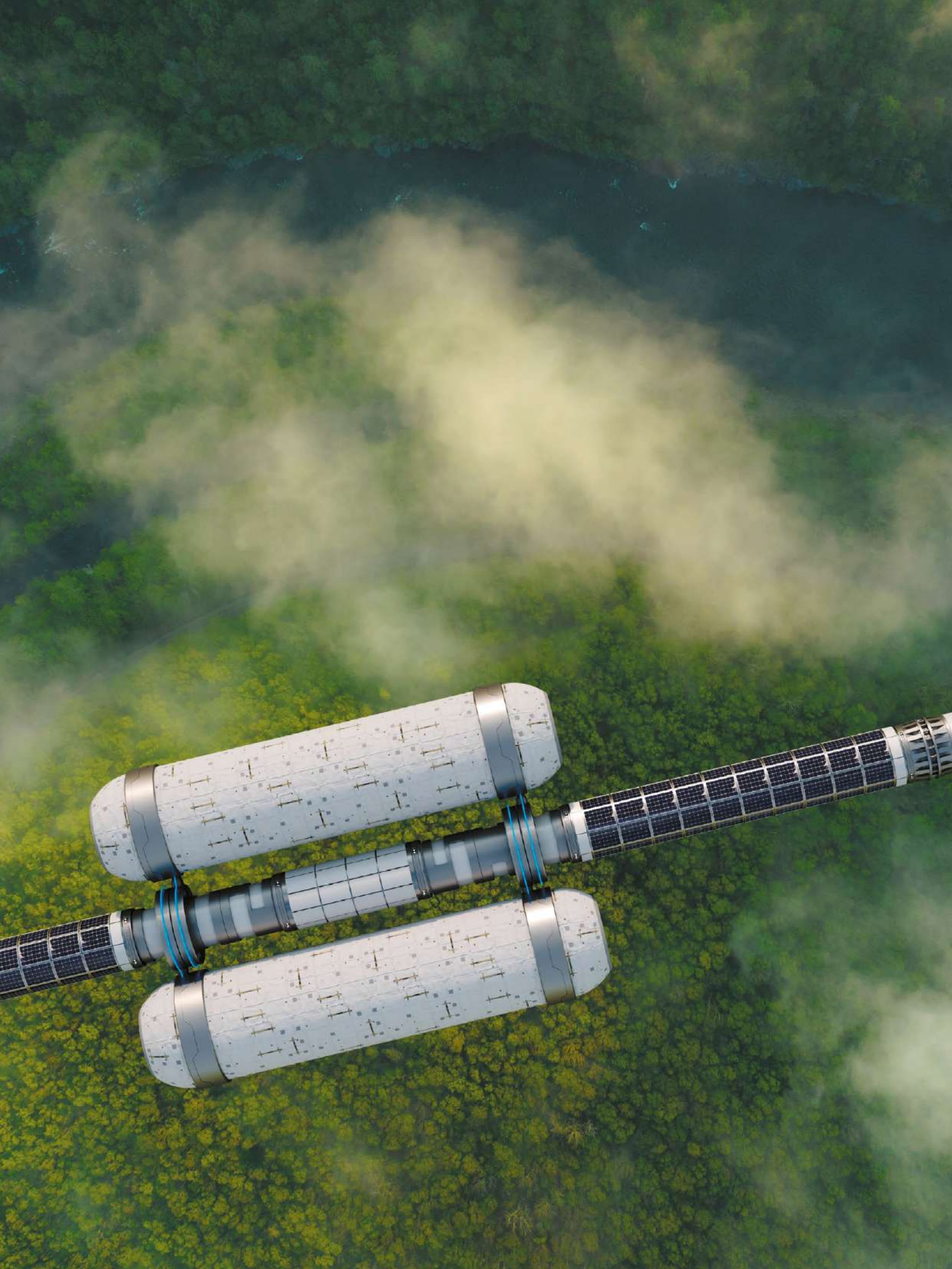
Проекты, подобные КИО «Орбита», демонстрируют потенциал создания многофункциональной космической инфраструктуры, способной реализовать жизнеобеспечение, логистику и безопасность человечества за пределами Земли. Слияние инфраструктурных и интеллектуальных цифровых технологий может стать основой построения масштабируемых, автономных и надёжных систем для устойчивого освоения ближнего, а в перспективе – и дальнего космоса. Решение выявленных проблем (нехватка оперативных данных, риск отказов, уязвимость кибербезопасности и необходимость автономности) возможно только при системном подходе к цифровизации космической среды и тесной интеграции информационных технологий с инженерными и биотехническими компонентами космических систем.

Список основных источников

1. *Aerospace Artificial Intelligence (AI) Market Analysis North America, Europe, APAC, Middle East and Africa, South America – US, Canada, UK, China, Germany, France, Italy, India, Japan, South Korea – Size and Forecast 2025–2029 // Technavio. – URL: https://www.technavio.com/report/aerospace-artificial-intelligence-market-industry-analysis (date of access: 20.02.2025).*
2. *Светлов, М. Собственное космическое агентство хотят создать в Беларуси / М. Светлов // Myfin. – URL: https://myfin.by/article/zhizn/cobstvennoe-kosmiceskoe-agentstvo-khotat-sozdat-v-belarusi-37821. – Дата публ.: 29.05.2025.*
3. *Осколкова, Д. По стопам «Интерстеллара»: топ-5 космических технологий будущего / Д. Осколкова // it.speaker. – URL: https://itspeaker.ru/news/po-stopam-interstellara-top-5-kosmicheskikh-tekhnologiy-budushchego/. – Дата публ.: 12.04.2025.*
4. *Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск: СтройМедиаПроект, 2025. – 532 с.*
5. *Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А.Э. Юницкий. – Силакрогс: ПНБ принт, 2019. – 576 с.*
6. *3D-печать // СВ ПЛАНТ. – URL: https://sw-plant.by/3d-printing (дата обращения: 30.04.2025).*
7. *Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск: СтройМедиаПроект, 2024. – 492 с.*
8. *uSpace. Геокосмическая программа безракетного освоения ближнего космоса для спасения жизни на Земле // uSpace. – URL: https://uspaceprogram.com/?lang=ru (дата обращения: 20.02.2025).*
9. *Halloran, K. NASA's AI Use Cases: Advancing Space Exploration with Responsibility / K. Halloran // NASA. – URL: https://www.nasa.gov/organizations/ocio/dt/ai/2024-ai-use-cases/?utm_source. – Publ. date: 07.01.2025.*
10. *AI in Space Exploration Global Market Report 2025 // The Business Research Company. – URL: https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/ai-in-space-exploration-global-market-report?utm_source (date of access: 30.04.2025).*

Секция

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЗАМКНУТЫХ ЭКОСИСТЕМ БИОСФЕРНОГО ТИПА НА ЗЕМЛЕ И В КОСМОСЕ



УДК 629.7+612:613+159.9

Международный проект SIRIUS-23

О.С. Мастицкая[1]

Е.И. Яблонская[2]

[1] Институт физико-органической химии НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

[2] ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

Международный проект SIRIUS-23 направлен на изучение адаптации организма человека к условиям длительного автономного пребывания в замкнутом пространстве, в том числе в космосе. Моделирование космического полёта проводилось в наземном экспериментальном комплексе Института медико-биологических проблем Российской академии наук (г. Москва, Россия).

В статье рассмотрены организация эксперимента, структура изоляционной базы, особенности отбора и подготовки экипажа, а также важные аспекты научной программы, включающей более 60 исследований по психологии, физиологии, иммунологии, микробиологии, молекулярной биологии, ботанике и медицине.

Особое внимание уделено участию белорусского испытателя, выполнявшей программные задачи в интересах научных учреждений Национальной академии наук Беларуси (исследования вариабельности сердечного ритма, эффективности про- и пребиотических добавок и др.). Описан режим труда и отдыха, показана организация физической тренировки, внекорабельной деятельности, депривации сна, а также работы в нештатных ситуациях. Отмечен потенциал применения полученных результатов при подготовке будущих космических миссий.

Ключевые слова:
вариабельность сердечного ритма, внекорабельная деятельность, депривация сна, длительная изоляция, лунная миссия, микрозелень, НЭК ИМБП РАН, про- и пребиотики, психофизиология экипажа, SIRIUS.

UDC 629.7+612:613+159.9

International SIRIUS-23 Project

O. Mastitskaya[1]

K. Yablonskaya[2]

[1] Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

[2] Astroengineering Technologies LLC, Minsk, Belarus

The international SIRIUS-23 project is aimed at studying adaptive processes in the human organism that may occur during prolonged autonomous residence in a confined environment, including space. The spaceflight simulation was conducted in the Ground-Based Experimental Facility of the Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia).

This article discusses the organization of the experiment, the structure of the sealed complex, the selection and training of the international crew, and the key areas of the scientific program, which includes over 60 studies in psychology, physiology, immunology, microbiology, molecular biology, experimental botany, and medicine.

Special attention is given to the participation of the Belarusian subject, who performed program tasks on behalf of scientific organizations of the National Academy of Sciences of Belarus (investigations of heart rate variability, the efficiency of pro- and prebiotic supplements, etc.). The work/rest schedule is described, and the organization of physical training, extravehicular-type activities, sleep deprivation, and performance under emergency conditions is presented. The potential application of the obtained results for the preparation of future space missions is discussed.

Keywords:
crew psychophysiology, extravehicular-type activity, Ground-Based Experimental Facility of the IBMP RAS, heart rate variability, lunar mission, microgreens, SIRIUS, sleep deprivation, pro- and prebiotics, prolonged isolation.

Введение

Международный проект SIRIUS (Scientific International Research in Unique Terrestrial Station) реализуется на базе наземного экспериментального комплекса Института медико-биологических проблем Российской академии наук (НЭК ИМБП РАН) и представляет собой серию поэтапно усложняющихся изоляционных экспериментов длительностью 17, 120, 240 и 366 суток. Цель проекта – моделирование важных аспектов пилотируемых миссий за пределы низкой околоземной орбиты, включая полёт к Луне, работу на её поверхности и возвращение на Землю, изучение медико-биологических, психофизиологических и операционных вопросов [1].

Ранее в рамках проекта реализованы этапы SIRIUS-17 (17 суток, 2017 г.) [2], SIRIUS-19 (120 суток, 2019 г.) [3] и SIRIUS-21 (240 суток, 2021 г.) [4], в которых участвовали международные экипажи исследователей из России, США, Германии и ОАЭ [5]. SIRIUS-23 (366 суток, 2023 г.) [6–9] стал первым годовым изоляционным экспериментом и заключительным звеном программы, сконцентрированным на комплексном изучении адаптации человека к условиям длительной автономной миссии с элементами лунного сценария.

В состав команды SIRIUS-23 впервые вошла представитель Республики Беларусь, выполнявшая как общие задачи эксперимента, так и специализированные работы в рамках программ НАН Беларуси [10]. Белорусские учёные уже более 60 лет проводят исследования в области авиакосмической медицины и биологии, что создало прочную основу для участия страны в международных космических проектах.

Присоединение Беларуси к SIRIUS-23 позволило интегрировать в общую научную программу ряд национальных разработок – от тестирования портативного кардиорегистратора до опытов по выращиванию микрозелени и применению про- и пребиотических добавок. Эти исследования не только расширили комплекс задач SIRIUS-23, но и продемонстрировали потенциал белорусских технологий в условиях изоляции и моделируемого космического полёта.

Таким образом, цель настоящей работы – анализ организации и научной программы международного эксперимента SIRIUS-23, в ходе которого были смоделированы условия длительной пилотируемой лунной миссии, а также обобщение научно-практического опыта участия белорусского испытателя в выполнении медико-биологических, психофизиологических и ботанических исследований.

Наземный экспериментальный комплекс и сценарий миссии

НЭК ИМБП РАН представляет собой герметичный комплекс из нескольких функциональных модулей общим объёмом около 500 м^3 с искусственной средой обитания, системами жизнеобеспечения, управления и связи, а также специализированными зонами для научных исследований и физической подготовки. Архитектура сооружения содержит элементы орбитального и лунного сегментов, что позволяет моделировать этапы полёта к Луне, пребывание на окололунной орбите, высадку на спутник Земли и возвращение на нашу планету (рисунок 1) [7].

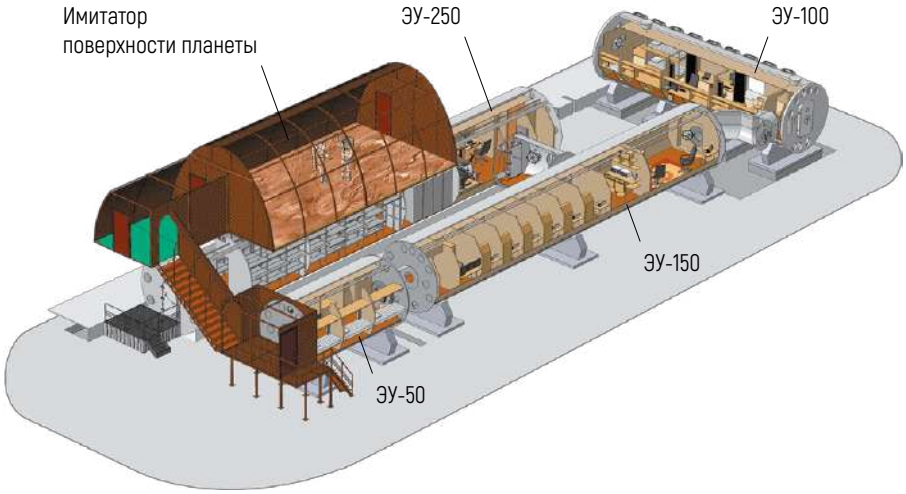


Рисунок 1 – Наземный экспериментальный комплекс Института медико-биологических проблем Российской академии наук

Основа НЭК ИМБП РАН для SIRIUS-23:

• жилой модуль (ЭУ-150), включающий личные каюты членов экипажа, кухню, комнату отдыха, санузел;

• медицинский модуль (ЭУ-100), предназначенный для проведения инвазивных и неинвазивных исследований, процедур медицинского контроля и отбора биоматериала;

• спортивный модуль (ЭУ-250), оснащённый тренажёрами (активная и пассивная беговые дорожки, велоэргометр и др.). Кроме того, в нём расположены оранжерея и складские помещения для хранения продовольственных и непродовольственных запасов (продукты питания, посуда, одежда и др.).

Для имитации посадки использовался модуль ЭУ-50, имеющий шлюзовую камеру для выхода на поверхность планеты. В нём проходили тренировки по высадке части экипажа на Луну. Работы на имитируемой лунной поверхности выполнялись с применением систем виртуальной реальности и стендов обезвешивания, моделирующих состояние невесомости.

Сценарий миссии предполагал следующие этапы: полёт к Луне, операции на орбите, многократные высадки и возвращение, что позволило включить в план разнообразные научные и эксплуатационные эксперименты, а также отработку алгоритма действий в случае аварийных ситуаций.

Отбор участников и состав экипажа

На этапе предварительного формирования экипажа рассматривались восемь претендентов (четверо мужчин и четыре женщины), прошедших углублённое медицинское обследование, а также тестирование психической устойчивости, личностных характеристик и готовности к длительной изоляции. Важным критерием являлась способность самостоятельно выполнять сложные научные протоколы и работать в условиях ограниченного пространства и ресурсов.

Финальный состав SIRIUS-23 (рисунок 2) включал шесть испытателей (двое мужчин и четыре женщины): Чеботарёв Юрий Сергеевич (Россия) – командир экипажа; Парфёнова Анжелика Анатольевна (Россия) – бортинженер; Орлова Ксения Дмитриевна (Россия, резидент государства Асгардия) – врач; Шишенина Ксения Сергеевна (Россия), Зарипов Рустам Назимович (Россия) и Мастицкая Ольга Сергеевна (Беларусь) – исследователи [7].

Участие белорусского представителя обусловлено выполнением национальной космической программы, которая предусматривала в том числе отбор женщин-космонавтов и привлечение кандидатов к реализации наземных изоляционных проектов.

а)

б)

Рисунок 2 – Экипаж SIRIUS-23:
а – полный состав;
б – представитель Республики Беларусь Мастицкая Ольга Сергеевна

Подготовка экипажа и фоновые исследования

Подготовительный этап, продолжавшийся 2,5 месяца, включал:

• командообразующие тренинги и выездные мероприятия (двухдневное выживание в лесистой местности Смоленской области, в том числе автономная организация быта, питания и отдыха);

• ознакомление с НЭК ИМБП РАН, отработка навыков использования систем жизнеобеспечения, связи, а также действий при аварийных ситуациях;

• изучение методик научных экспериментов, запланированных на период изоляции;

• выполнение фоновых (базовых) измерений для последующего сравнения с данными, полученными в ходе миссии и на завершающем этапе.

Особое внимание уделялось обучению работе с медицинским оборудованием (портативные кардиорегистраторы,

велоэргометры и устройства для биоимпедансного анализа и др.), а также с экспериментальными установками для оценки зрительной, сердечной и костной систем. Кроме того, изучалось техническое оснащение оранжереи для культивирования растений в контролируемых условиях.

Последняя неделя подготовки включала обсервацию экипажа, предусматривающую ограничение внешних контактов для стабилизации функционального состояния перед входом в изоляцию и снижения риска инфекционных заболеваний [1].

Режим работы экипажа SIRIUS-23

Годовой проект SIRIUS-23 стартовал 14 ноября 2023 г.: экипаж начал работу в НЭК ИМБП РАН и перешёл на полностью автономный режим, исследования осуществлялись по циклограммам, формируемым наземной командой.

Ежедневный распорядок участников эксперимента: утренний медицинский контроль, основные научные сессии, периоды физической подготовки, решение бытовых задач, а также регламентированный отдых.

Циклограмма позволяла варьировать нагрузки, чередуя дни с высокой плотностью научных и технических операций с более «мягкими» днями. Полноценные выходные отсутствовали, а в субботу и воскресенье выполнялись обязательные, но укороченные программы. Такая организация соответствовала реальному режиму работы экипажа в длительной космической экспедиции.

Ключевая особенность – сочетание строго регламентированных блоков (исследования, тренировки, внекорабельная деятельность, аварийные сценарии) с контролируемым, но относительно свободным временем, используемым для досуга, личных дел и психологической разгрузки.

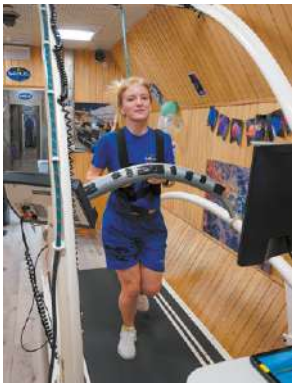
Медицинский мониторинг

Ежедневный медицинский контроль предполагал измерение артериального давления (АД), частоты сердечных сокращений (ЧСС), сатурации, вариабельности сердечного ритма (ВСР), а также проведение электрокардиограммы (ЭКГ) с помощью портативного кардиорегистратора, разработанного Институтом физиологии НАН Беларуси. Данные по ВСР и ЭКГ, полученные в покое и во время нагрузочных тестов на велоэргометре, в конце каждого месяца передавались белорусской стороне для последующего анализа адаптационных реакций сердечно-сосудистой системы в условиях изоляции и изменённого двигательного режима.

Использование компактного кардиорегистратора продемонстрировало высокую информативность при минимальных габаритах и массе оборудования, показав значительный потенциал для включения подобных устройств в бортовой комплекс мониторинга состояния экипажей будущих длительных миссий.

Физическая подготовка и профилактика гиподинамии

Совершенствование подходов к оценке и контролю физического состояния в условиях космических полётов – важная и востребованная научно-практическая задача. Программа физической подготовки включала тренировки на активной и пассивной беговых дорожках, а также на велоэргометре по циклической схеме: три дня занятий на каждом тренажёре с последующим днём отдыха (рисунок 3).



а)

б)

в)

Рисунок 3 – Тренировки в рамках программы физической подготовки:
а – на активной беговой дорожке;
б – на пассивной беговой дорожке; в – на велоэргометре

После пяти микроциклов максимальную физическую работоспособность тестировали по подобранной методике [11]. Такое расписание позволяло не только поддерживать физическую форму, снижать риски, связанные с гиподинамией, но и получать массив данных по динамике функциональных показателей в условиях длительной изоляции.

По итогам пройденной программы отмечен субъективный профиль нагрузок на тренажёрах. В частности, испытатель из Беларуси предпочитала пассивную беговую дорожку как способ добиться более интенсивной работы при занятиях по специфической моторной схеме, что может быть полезно при подборе индивидуальных тренировочных программ для космонавтов.

Кроме того, учёные, используя новый тест на велоэргометре, сравнили физическое состояние участников изоляционных экспериментов SIRIUS-21 и SIRIUS-23 и отметили отсутствие значимых различий по показателям ЧСС и пикового потребления кислорода [11]. При этом отклонения в измерениях могут быть связаны с исходными физическими данными членов экипажа и разной системой профилактики сниженного уровня двигательной активности.

Научная программа и роль белорусского участника

Научная и операционно-техническая программы SIRIUS-23 состояли из более чем 60 исследований по направлениям: психология и психофизиология, физиология и медицина, иммунология, космическая ботаника и технологии жизнеобеспечения. Кроме того, проводились биохимические и молекулярно-биологические, санитарно-гигиенические и микробиологические опыты. Таким образом осуществлялось комплексное изучение адаптации человека и биологических систем к условиям длительной изоляции и моделируемого космического полёта, что является ключевым аспектом для подготовки будущих экспедиций за пределы Земли.

Все эксперименты выполнялись членами экипажа самостоятельно после прохождения соответствующего обучения и отработки протоколов. Данный подход позволял моделировать реальные требования к автономной деятельности команды во время проведения космических миссий, где внешняя поддержка ограничена или полностью отсутствует. Вместе с тем соблюдалась периодичность исследований, что обеспечивало систематический мониторинг физиологических, психологических и биологических параметров на протяжении всего периода миссии.

Большое внимание уделялось распределению ответственности между членами экипажа: каждый эксперимент закреплялся за конкретным исполнителем. Это повышало надёжность и точность соблюдения протоколов, снижало риск пропусков или ошибок и содействовало формированию персонализированных траекторий научной нагрузки. Такой алгоритм учитывал индивидуальные особенности членов коллектива, включая уровень подготовки, компетенции и адаптационные возможности, и способствовал оптимизации рабочей и научной деятельности.

Испытатель из Беларуси выполняла ряд важных задач, которые поставили следующие отечественные научные учреждения:

- Институт физиологии НАН Беларуси – медицинские исследования по регистрации параметров ВСР, ЭКГ, сатурации, ЧСС, АД и фотоплетизмограммы в покое, а также запись показателей ЭКГ и ЧСС во время максимальной нагрузки на велоэргометре с использованием портативного кардиорегистратора (рисунок 4);

Рисунок 4 – Мониторинг сердечной деятельности в покое

- Институт экспериментальной ботаники НАН Беларуси – ботанические эксперименты по определению наиболее эффективного фотопериода для роста и улучшения органолептических характеристик (вкус, текстура, аромат) микрозелени свёклы и редиса (рисунок 5);
- Институт мясо-молочной промышленности, Институт микробиологии и Научно-практический центр по животноводству НАН Беларуси – исследования по применению про- и пребиотических добавок (продукты с лактоферрином и закваска «ПроксиМилк») для улучшения работы пищеварительной системы испытателей в условиях изоляции (рисунок 6).

Рисунок 5 – Эксперимент по изучению роста микрозелени редиса и свёклы при различном фотопериоде

Рисунок 6 – Применение про- и пребиотических добавок

Результаты ботанических опытов, проведённых белорусской участницей, показали, что семена свёклы и редиса, предоставленные Институтом экспериментальной ботаники НАН Беларуси, прорастают даже при небольшой длительности периода освещения (8 ч). Это подтверждает, что во время продолжительных космических полётов можно выращивать такие культуры, затрачивая минимальное количество энергии.

Кроме того, в бортовой оранжерее проводились другие биологические исследования, за которые отвечала член экипажа из Беларуси. Для экспериментов использовались кашпо с гидропонным субстратом на основе вермикулита и перлита, обогащённым минеральными солями, а также семенной материал 12 сортов сельскохозяйственных культур, предоставленный Институтом экспериментальной ботаники НАН Беларуси и ИМБП РАН. Для растений, высаженных в оранжерейном модуле, поддерживались следующие условия: контролируемый фотопериод (8–16 ч/сут), температура 22–26 °C и относительная влажность 60–70 %. Циклограммой миссии предусматривалось ежедневное регламентированное время (45–60 мин) для агротехнического обслуживания: полива, внесения жидких питательных растворов, формирующей обрезки и контроля за вредителями.

За две трети изоляционного периода получен урожай, включающий около 1 кг томатов черри и 5 кг листовой зелени (рисунок 7), что демонстрирует перспективность использования компактных агроблоков для частичного возмещения витаминной составляющей рациона космонавтов. Выращенная продукция вошла в основное меню экипажа, который оценил её органолептические характеристики, а также зафиксировал субъективно воспринимаемые изменения пищевого поведения (уровень аппетита, объём потребления, предпочтения в выборе продуктов и др.). Стоит отметить, что работа с растениями положительно влияла на психоэмоциональное состояние испытателей. Эти результаты подчёркивают роль космической ботаники не только в системах регенерации пищи, но и в обеспечении психологической поддержки членов команды.

Рисунок 7 – Урожай томатов и листовой зелени

Применение про- и пребиотических добавок рассматривалось как средство поддержания стабильности кишечной микробиоты и функционального состояния желудочно-кишечного тракта на фоне изменённого рациона и стрессовых факторов изоляции [12]. Оценка эффективности

проводилась на основании субъективных показателей самочувствия, клинико-лабораторных данных и динамики некоторых биомаркеров.

Другие направления, в которых принимала участие белорусский исследователь в качестве ответственного исполнителя:

• оценка состояния костно-мышечной системы на основе антропометрических показателей (измерение роста, объёмов тела, величины кожно-жировых складок, силы кисти) и биоимпедансного анализа состава тела (рисунок 8);

Рисунок 8 – Оценка состава тела
и состояния костно-мышечной системы

• комплексные исследования биомаркеров перекисного окисления липидов в выдыхаемом воздухе и крови человека, а также функционального состояния миокарда с регистрацией ЭКГ, сбором и подготовкой образцов выдыхаемого воздуха (рисунок 9);

Рисунок 9 – Сбор и анализ образцов выдыхаемого воздуха

• оценка функционального состояния зрительной системы человека-оператора, в том числе измерение электрочувствительности зрительного нерва.

В качестве ассистента белоруска участвовала в проведении работ по медицинскому контролю, в рамках которых осуществлялись:

• оценка состояния окружающей среды в модуле (уровень шума, запылённость, освещённость, микроклимат);

• термометрия кожи и регистрация кожного кровотока методом лазерной доплеровской флоуметрии на разных участках тела;

• функциональные пробы;

• регистрация ЭКГ для анализа вариабельности сердечного ритма при различных функциональных состояниях.

Внекорабельная деятельность, моделирование лунных операций

В рамках SIRIUS-23 проводилось пять серий внекорабельной деятельности (ВКД), моделирующих высадку на поверхность Луны с помощью лунного взлётно-посадочного модуля (ЭУ-50). В ходе ВКД экипаж разделялся на две группы: четыре участника перемещались в ЭУ-50 и выполняли внешние операции, двое оставались на «орбитальной станции».

Основные задачи ВКД:

• осуществление полевого функционального тестирования с применением очков виртуальной реальности, направленного на оценку моторики, координации и когнитивных функций при имитированной внекорабельной нагрузке (рисунок 10а);

• отработка движений и выполнения целевых операций в моделируемой лунной гравитации с использованием VR-очков и стенда обезвешивания тела, а также датчиков, установленных на ногах, для фиксации передвижения в виртуальной реальности (следование по заранее определённым маркерам, достижение назначенной точки и возвращение на исходную позицию) (рисунок 10б);

• сбор образцов «лунного грунта» посредством дистанционно управляемого ровера в положении обезвешенных рук, (рисунок 10в).

Белорусский испытатель участвовала в трёх из пяти серий высадок на «лунную поверхность», совмещая экспериментальную программу с адаптацией к специфике проживания в ограниченном объёме лунного модуля (при отсутствии индивидуальных кают и недостатке свободного времени).

а)

б)

в)

Рисунок 10 – Испытания в ходе ВКД:
а – функциональное тестирование в виртуальной реальности;
б – отработка передвижения
с использованием VR-очков и стенда обезвешивания тела;
в – управление ровером для сбора «лунного грунта»

Депривация сна как модель экстремальной нагрузки в нештатной ситуации

Один из наиболее сложных элементов эксперимента – эпизоды депривации сна длительностью до 38 ч [13, 14]. В это время экипаж выполнял широкий спектр научных задач и технических операций при запрете на употребление продуктов, содержащих кофеин. Проведено четыре эпизода депривации сна, каждый из которых требовал мобилизации максимальных физических и психических ресурсов членов команды. Эти периоды совпадали с моделируемым прибытием транспортных кораблей, которые доставляли посылки участникам от родных и близких.

Для поддержания работоспособности применялась комбинация чёткой циклограммы ночной деятельности, чередования типов задач и целенаправленных приёмов психологической саморегуляции, включая монотонные, но увлекающие занятия (например, сбор пазлов в зоне видимости камер), что помогало предотвращать засыпание в пассивных позах. Следует отметить, что получение посылок имело не только операционный, но и выраженный психологический эффект. Предметы повседневного обихода, которые в обычной жизни воспринимаются как незначительные, в условиях длительной изоляции оказывали заметное положительное влияние на эмоциональную устойчивость экипажа, способствуя повышению настроения и мотивации.

Рабочая активность и состояние членов команды в периоды депривации находились под постоянным контролем дежурной бригады, обеспеченной возможностью оперативной связи, что позволяло своевременно реагировать на возникающие проблемы и поддерживать безопасность выполнения задач.

Отработка нештатных ситуаций и тренировка психоэмоциональной устойчивости

В ходе миссии моделировались технические проблемы, которые могут возникнуть в реальном космическом полёте:

- сбои в системе очистки воздуха и увеличение концентрации углекислого газа;
- задержка транспортного корабля;
- выключение электричества в модулях;
- выход из строя бытовых коммуникаций;
- нарушения в функционировании систем связи.

Работа в условиях повышенной концентрации CO_2 потребовала от экипажа чёткого следования инструкциям и скоординированного перемещения в модули с более низким уровнем углекислого газа, что послужило проверкой алгоритмов взаимодействия и принятия решений при растущем физиологическом и психологическом напряжении. Время отсутствия связи с родными и близкими (до нескольких недель) оценивалось участниками как эмоционально самое сложное. В такие периоды важная роль отводилась хобби, внутренней мотивации и поддержке со стороны других членов команды.

Изучение коммуникации экипажа в условиях длительной изоляции

Как и во всех изоляционных проектах [15, 16], в SIRIUS-23 изучение структуры и динамики межличностных коммуникационных связей в экипаже – одно из ключевых направлений

психофизиологических исследований. Применялись социокартирование, опросник (оценочные анкеты по пятибалльной шкале эмоциональной напряжённости и удовлетворённости работой и командной жизнью), контент-анализ аудио- и видеозаписей взаимодействия (более 500 ч материала), а также ежедневные дневниковые записи участников.

В течение 366-суточной миссии динамика коммуникаций эволюционировала следующим образом: на этапе адаптации преобладали формальные связи, затем наблюдался постепенный переход к неформальным структурам, что свидетельствовало о появлении сплочённости. Пиковые нагрузки на коммуникацию фиксировались в периоды ВКД и депривации сна – тогда индекс конфликтности повышался, но быстро восстанавливался благодаря командным ритуалам (праздники, совместные приёмы пищи и др.).

Полученные данные позволят разработать алгоритмы прогнозирования и коррекции коммуникационных дисбалансов в реальных космических миссиях, обеспечивая эффективное взаимодействие экипажа в автономном режиме. Вклад белорусского участника в эти исследования заключался в ассистировании при проведении социометрических сессий.

Быт, рацион и досуг как факторы адаптации

Рацион экипажа сформирован специалистами ИМБП РАН в виде сбалансированного двухнедельного меню, включающего консервированные и сублимированные продукты, космическое питание в тубах и напитки. Список блюд максимально приближен к программе питания космонавтов на борту Международной космической станции [17].

В рамках прошлых изоляционных проектов проводился количественный и качественный анализ расхода материалов, в том числе текстильных изделий (бельё, одежда), средств личной гигиены и бытовой химии [18]. В SIRIUS-23 изучались состав и масса всех отходов от экипажа, что стало отдельной научно-исследовательской темой. Контроль запасов продуктов питания и расходных материалов осуществлялся автоматизированной системой штрихкодирования (бар-код). Каждой единице номенклатуры (свыше 1200 позиций) присваивался уникальный идентификатор, сканируемый с помощью портативных считывателей при выдаче и списании. Это обеспечивало отслеживание остатков в реальном времени с точностью ±0,5 % и формирование ежедневных отчётов о потреблении, необходимых для наземного контроля. Роль белорусского представителя заключалась в ассистировании при сканировании и первичной сортировке отходов. Полученные данные послужат основой для оптимизации систем рециклинга в автономных миссиях (лунные, марсианские), позволив минимизировать массу завозимых запасов и объём отходов.

Бытовые обязанности каждого участника проекта предполагали подготовку завтрака, обеда и ужина для команды, уборку санитарных зон в конце дня и еженедельную генеральную уборку комплекса всем составом, что способствовало формированию чувства коллективной ответственности. Возможность принять полноценный душ была лимитирована. Это дополнительно моделировало ресурсные ограничения длительных миссий.

В свободное время испытатели занимались чтением, рисованием, рукоделием (вышивка, алмазная мозаика), сбором пазлов, просмотром фильмов, а также настольными играми вместе с другими членами экипажа, что воспринималось как важный элемент психологической поддержки и профилактики эмоционального выгорания (рисунок 11). Особое значение придавалось празднованию дней рождения и календарных дат – тематически оформлялись модули, дарились небольшие подарки и готовились импровизированные десерты из доступных продуктов. Это поддерживало ощущение событийности и «нормальности» жизни в условиях изоляции.

Рисунок 11 – Хобби как элемент психологической разгрузки

Период последействия и реабилитация экипажа

После завершения 12-месячного цикла команда покинула НЭК ИМБП РАН и перешла к этапу последействия, включавшему двухнедельную обсервацию и интенсивную программу постэкспериментальных исследований, направленных на оценку динамики восстановления физиологических и психических функций. Для участников был

организован курс реабилитации в санаторно-курортных условиях (санаторий «Южное взморье», г. Сочи), предусматривающий физиотерапию, климатотерапию и дозированную физическую активность (рисунок 12).

Рисунок 12 – Реабилитация экипажа после миссии

Согласно традиции экипаж SIRIUS-23 посадил магнолию на «Аллее космонавтов» (г. Сочи), что подчеркнуло преемственность между наземными изоляционными исследованиями и реальными космическими полётами, а также символизировало вклад эксперимента в подготовку будущих космических экспедиций (рисунок 13).

Рисунок 13 – Символическая посадка магнолии экипажем SIRIUS-23

Заключение

Годовой эксперимент SIRIUS-23 стал значимым шагом в развитии технологий и методик медико-биологического обеспечения пилотируемых космических полётов. Комплексный мониторинг состояния здоровья в сочетании с многопрофильной научной программой, моделированием лунных операций и нештатных ситуаций позволил собрать уникальный массив данных о реакции организма и психики человека на длительную изоляцию и высокую операционную нагрузку.

Вклад белорусской стороны проявился в интеграции портативных систем кардиомониторинга, разработке и апробации технологий выращивания микрозелени и овощных культур в ограниченных условиях, а также в оценке эффективности про- и пребиотических добавок для поддержания здоровья экипажа. Полученные результаты представляют интерес для дальнейшего развития национальных космических исследований, международных программ по освоению космоса, а также при создании жилых космических станций типа ЭкоКосмоДом, разрабатываемых в рамках глобальной программы uSpace [19].

Участие белорусского испытателя подтверждает, что привлечение исследователей из новых космических держав в сложные международные проекты не только повышает качество научных данных, но и способствует формированию кадрового резерва для будущих пилотируемых полётов. Личный опыт длительной изоляции, работы по насыщенной научной программе и задействование в моделировании лунной миссии служат важными элементами подготовки потенциальных кандидатов в космонавты [20].

Благодарности

Авторы выражают благодарность организаторам и участникам международного проекта SIRIUS-23 – Институту медико-биологических проблем РАН, НАН Беларуси, Институту физико-органической химии НАН Беларуси. Особая признательность – начальнику управления аэрокосмической деятельности НАН Беларуси, заместителю руководителя Агентства по космическим исследованиям НАН Беларуси, академику НАН Беларуси, доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю науки Республики Беларусь П.А. Витязю, а также заместителю начальника управления аэрокосмической деятельности НАН Беларуси И.Н. Буче за содействие в организации участия представителя Республики Беларусь в проекте SIRIUS-23.

Список основных источников

1. *Научное исследование в уникальном наземном комплексе SIRIUS // SIRIUS. – URL: http://sirius.imbp.ru/index.html (дата обращения: 10.05.2025).*

2. *Эксперимент SIRIUS-17 // SIRIUS. – URL: http://sirius.imbp.ru/completed/index17.html (дата обращения: 10.05.2025).*
3. *Эксперимент SIRIUS-19 // SIRIUS. – URL: http://sirius.imbp.ru/completed/index19.html (дата обращения: 10.05.2025).*
4. *Эксперимент SIRIUS-21 // SIRIUS. – URL: http://sirius.imbp.ru/sirius21/index.html (дата обращения: 10.05.2025).*
5. *Международный изоляционный научный эксперимент «SIRIUS» // Национальная академия наук Беларуси. – URL: https://nasb.gov.by/rus/news/13695/. – Дата публ.: 20.11.2023.*
6. *Специальный репортаж. Международный проект SIRIUS-2023. Эксперимент – работа на лунной поверхности // news.by. – URL: https://news.by/videogallery/informatsionno-analiticheskie/spetsialniy-reportazh/spetsialniy-reportazh-mezhdunarodniy-proekt-sirius-2023-eksperiment-rabota-na-lunnoy-poverkhnosti. – Дата публ.: 25.12.2024.*
7. *Международный научный проект SIRIUS. Этап четвёртый: SIRIUS-23 // SIRIUS. – URL: http://sirius.imbp.ru/download/Booklet_Sirius-23_ru.pdf (дата обращения: 15.12.2025).*
8. *David, L. Russia's Long-Duration Space Journey on Earth Put 6 People in Isolation for a Year / L. David // Space.com. – URL: https://www.space.com/russia-sirius-23-astronaut-isolation-study. – Publ. date: 19.11.2023.*
9. *Choudhury, R. Russian Space Simulation Experiment Isolates Six Volunteers for a Year // Interesting Engineering. – URL: https://interestingengineering.com/innovation/russian-space-simulation-experiment-isolates-six-volunteers-for-a-year. – Publ. date: 19.11.2023.*
10. *Белоруска Ольга Мастицкая о результатах годового эксперимента SIRIUS-23 // Геоинформационные системы. – URL: https://gis.by/ru/news/4 (дата обращения: 15.12.2025).*
11. *Бахтерева, В.Д. Оценка физической работоспособности человека на основе нового теста на велоэргометре в экспериментах с продолжительной изоляцией / В.Д. Бахтерева, М.А. Кокуева, Е.В. Фомина // Новости медико-биологических наук. – 2024. – Т. 24, № 3. – С. 15–16.*
12. *Питание космонавтов. Учёный рассказала о закваскаx для сбалансированного рациона // БелТА. – URL: https://belta.by/society/view/pitanie-kosmonavtov-uchenyj-rasskazala-o-zakvaskah-dlja-sbalansirovannogo-ratsiona-708686-2025/. – Дата публ.: 12.04.2025.*
13. *Титянечко, Р. Конфликты, 38 часов без сна и полёт на Луну: Ольга Мастицкая о годовом эксперименте SIRIUS-23 / Р. Титянечко // ProKosmos. – URL: https://prokosmos.ru/2024/11/21/konflikti-38-chasov-bez-sna-i-polet-na-lunu-olga-mastitskaya-o-godovom-eksperimente-sirius-23. – Дата публ.: 21.11.2024.*
14. *Волочкович, Т. «Сириус» летит на Луну / Т. Волочкович // Минский курьер. – 2025. – 16 мая. – С. 16–17.*
15. *Sociomapping Qualitative Analysis of the Structure and Dynamics of Relationships in the Crews of SIRIUS-19 and SIRIUS-21 During a Simulated Space Mission to the Moon Through the Lens of Comparison / K. Bernardova Sykorova, E. Chroustova, M. Klosova [et al.] // Journal of Space Safety Engineering. – 2024. – Vol. 11, iss. 4. – P. 628–635.*
16. *Structure and Dynamics of Crew Communication in Three SIRIUS Isolation Missions / E. Hoschlova, R. Bahbouh, M. Huzva [et al.] // Acta Astronautica. – 2024. – Vol. 225. – P. 467–476.*
17. *Агуреев, А.Н. Вопросы питания в межпланетных космических полётах / А.Н. Агуреев, М.С. Белаковский // Воздушно-космическая сфера. – 2021. – № 1 (106). – С. 44–57.*
18. *Шумилина, И.В. Изучение потребления белья, одежды, средств личной гигиены в ходе экспериментов по проекту SIRIUS / И.В. Шумилина // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2021. – Т. 55, № 6. – С. 61–67.*
19. *Юницкий, А.Э. Особенности проектирования жилого космического кластера «ЭкоКосмоДом» – миссия, цели, назначение / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 51–57.*
20. *В НАН ознакомились с результатами экспериментов белорусского участника российского научного проекта SIRIUS // Информационно-аналитический портал Союзного государства. – URL: https://soyuz.by/obshchestvo/v-nan-oznakomilis-s-rezultatami-eksperimentov-belorusskogo-uchastnika-rossiyskogo-nauchnogo-proekta-sirius. – Дата публ.: 29.01.2025.*

УДК 631.81+629.7

Разработка составов для дражирования семян в условиях ЭкоКосмоДома

А.В. Коледа

Е.В. Веремко

Е.В. Шерешовец

ЗАО «Струнные технологии»,
г. Минск, Беларусь

Рассмотрено дражирование как один из эффективных способов предпосевной обработки семян, в том числе при ведении органического сельского хозяйства с применением гумусопонных технологий. Описаны главные преимущества и недостатки данного метода, особое внимание уделено специфике процесса.

Разработаны экологически безопасные природные составы оболочки дражированных семян, подходящие для использования как в обычных земных условиях, так и в замкнутой среде ЭкоКосмоДома.

Изготовлены образцы дражированных семян редиса с уникальными составами оболочки, заметно улучшающими всхожесть, устойчивость к различным стрессам, а также общее качество фенотипических признаков. При этом учитывались потребности растений в элементах питания на начальной стадии развития. Проведён сравнительный анализ результатов проращивания дражированных и необработанных семян, который подтвердил эффективность рассматриваемого метода предпосевной подготовки.

Полученные данные демонстрируют перспективность применения дражирования для повышения качества и устойчивости редиса в замкнутых экосистемах.

Ключевые слова:
дражирование семян, замкнутая экосистема, натуральный состав, питательная оболочка, предпосевная обработка, ЭкоКосмоДом (ЭКД).

UDC 631.81+629.7

Development of Compositions for Seed Pelleting in EcoCosmoHouse Conditions

A. Kaliada

Y. Viaremka

A. Sharashovets

Unitsky String Technologies Inc., Minsk, Belarus

Pelleting is considered as one of the effective methods of pre-sowing seed treatment, as well as for organic farming using humic technologies. The main advantages and disadvantages of this method are described, with particular attention paid to the specifics of the process.

Environmentally friendly natural compositions of coated seed shells have been developed, suitable for use both in normal soil conditions and in the closed environment of the EcoCosmoHouse.

Considering the nutritional requirements of plants during the early stages of growing, samples of pelleted radish seeds with unique coating compositions were produced, which significantly improved germination rates, stress tolerance, and the overall quality of phenotypic traits. A comparative analysis of the germination performance of coated and uncoated seeds confirmed the effectiveness of this pre-sowing treatment method.

The data obtained demonstrate the promise of using pelleting to improve the quality and resistance of radishes in closed ecosystems.

Keywords:
closed ecosystem,
EcoCosmoHouse (ECH),
natural composition,
nutrient coating,
pre-sowing treatment,
seed pelleting.

Введение

При создании в ЭкоКосмоДоме (ЭКД) условий, максимально приближенных к земным, остаётся актуальным вопрос о получении высокой урожайности сельскохозяйственных культур [1].

В мировой практике существует большое количество способов предпосевной обработки семян с целью снижения потерь урожая из-за болезней или вредителей [2]. Популярным методом считается процесс дражирования, который предполагает покрытие семян защитной питательной оболочкой [3]. Благодаря своему натуральному составу она положительно влияет на всхожесть, рост и развитие культур [4]. Одно из важнейших преимуществ дражирования заключается в том, что доза препаратов сконцентрирована непосредственно около семян, что позволяет обеспечить их всем необходимым уже на начальном этапе [5].

Таким образом, разработка специальных составов для создания искусственной оболочки семян является актуальным направлением в предпосевной подготовке [3].

Цель настоящего исследования – создание натуральных, экологически безопасных составов питательной оболочки для семян редиса, что будет способствовать улучшению всхожести культуры.

Поставленные задачи: рассмотреть дражирование как один из методов предпосевной обработки семян в ЭКД; определить преимущества и недостатки данного метода, а также особенности процесса; предложить оптимальные составы для изготовления оболочки семян редиса; произвести в лабораторных условиях образцы семян, выполнить их проращивание в грунте.

Дражирование семян: основные задачи

В мировой практике известны следующие приёмы предпосевной обработки семян: воздействие электрической энергии, сортировка, обеззараживание, скарификация, стратификация, промораживание, намачивание, барботирование, протравливание, инкрустирование, дражирование и др. [5]. Наиболее распространённым способом является дражирование – комплексная подготовка семян, включающая протравливание, обработку стимуляторами роста, удобрениями и иными средствами защиты. При этом на поверхности семян создаётся защитный питательный слой, благодаря которому растение полноценно развивается, получая все необходимые элементы [6].

Процесс дражирования позволяет решить одновременно такие задачи, как:

- борьба с болезнями и вредителями. В состав оболочки могут входить фунгициды и инсектициды, защищающие семена от патогенов и насекомых;
- ускорение прорастания. Стимуляторы роста, используемые при дражировании, способствуют более быстрому и равномерному прорастанию;
- улучшение хранения. Обработанные семена оказываются устойчивее к неблагоприятным условиям при хранении;
- защита окружающей среды. Уменьшается количество подкормок, сокращаются площади, на которых применяются препараты;
- увеличение размера семян. При обработке создаётся оболочка, которая может состоять из нескольких слоёв, тем самым упрощается равномерный высев [5].

По завершении процесса дражирования семена приобретают более крупные размеры, а также оболочку, в состав которой могут входить фунгициды, пестициды, удобрения, стимуляторы роста [7].

Подбор компонентов для оболочки дражированных семян редиса

Правильный подбор рецептуры для оболочки дражированных семян – это комплексный процесс, который требует учёта множества факторов и имеет решающее значение, так как напрямую оказывает влияние на всхожесть и развитие растений.

Как упомянуто ранее, состав оболочки для каждой культуры зависит от потребности в том или ином компоненте. Рассмотрим ключевые факторы, которые следует учитывать:

- вид семян. Семена, требующие особой защиты от вредителей или болезней, предполагают наличие в оболочке специфических фунгицидов или инсектицидов. В данном исследовании при использовании натуральных компонентов такие функции выполняют агрономически ценные почвенные микроорганизмы и минералы;
- климатические параметры. Условия окружающей среды, в которых прорастают семена, приводят к необходимости применения определённых препаратов. Например, при высокой влажности используются средства против гнили, а при повышенных температурах – вещества, удерживающие влагу;
- специфика почвы. Практически вся почва имеет дефицит микро- и ультрамикроэлементов, который можно восполнить благодаря их содержанию в составе оболочки семян;

• экономические критерии. При разработке рецептуры для дражирования учитываются стоимость и доступность компонентов, определяющие финансовую целесообразность процесса [4].

На основе приведённых факторов подобраны натуральные составляющие для оболочки дражированных семян: зола, биогумус uTerra, вермикулит, глина, янтарная кислота, сульфат магния, эликсир плодородия uTerra.

Зола, которая образуется в результате сжигания органических материалов, оказывает значительное влияние на рост и развитие культур. Большое количество химических веществ позволяет использовать её как удобрение в агрономии и садоводстве. При том что зола не содержит азот, в её составе имеются другие основные макроэлементы (калий, фосфор, кальций, магний и др.), а также микроэлементы (молибден, медь, сера, цинк, кремний и др.), которые необходимы в период вегетации. Внесение золы улучшает структуру почвы, способствуя её аэрации и водопроницаемости. Для кислых почв зола осуществляет регулирование pH, что помогает создать благоприятные условия для роста многих культур [8].

Биогумус uTerra, полученный в процессе переработки органических отходов, – органическое удобрение, насыщенное питательными веществами, микроэлементами и ассоциациями агрономически ценных микроорганизмов. Благодаря этому он прекрасно подходит для улучшения продуктивности и здоровья растений [9]. Богатый питательными веществами биогумус ускоряет рост культур, повышает их устойчивость к неблагоприятным условиям, а также является источником азота, доступного для растений, что благоприятно сказывается на плодородии почвы. Применение биогумуса в оболочке дражированных семян – экологически чистый способ стимулирования роста культур и увеличения урожайности с помощью эндогенных компонентов бактерий – ауксиновых фитогормонов. Это делает данное удобрение отличным выбором в качестве ингредиента для дражирования [10].

Вермикулит – лёгкий, пористый и влагоёмкий материал, который часто используют при культивировании растений в тяжёлых почвенных горизонтах (суглинки, глины и др.). Основное его преимущество – способность удерживать влагу, а следовательно, сохранять оптимальный уровень влажности для прорастания семян. Кроме того, вермикулит является натуральным минералом, без химических добавок, что благоприятно отражается на окружающей среде [11].

В результате выветривания и разрушения горных пород образуется мелкозернистый осадочный материал, который играет значимую роль в агрономии, – глина. Она состоит из частиц минералов, также может содержать органические вещества и другие компоненты. При добавлении в оболочку удобрений и полезных элементов глина замедляет их высвобождение, обеспечивая длительное питание в процессе прорастания семян. Вместе с тем необходимо учитывать тип культур и условия их выращивания, чтобы получить наилучшие результаты [12].

Янтарная кислота, являясь органическим соединением, выполняет важную функцию в энергообмене растений посредством увеличения выхода аденозинтрифосфорной кислоты в митохондриях клеток, что особенно очевидно при прорастании. В небольших концентрациях янтарная кислота оказывает благотворное воздействие на семена. Основные положительные моменты – увеличение всхожести, а также ускорение прорастания за счёт более эффективного усвоения питательных веществ [13].

Сульфат магния ($MgSO_4$), который получают из морской воды или кизерита, служит источником магния и серы, а значит, стимулятором роста. Данное вещество играет одну из ключевых ролей в синтезе хлорофилла, что способствует активному образованию хлоропластов на ранней стадии развития культур. Это может привести к более быстрому и здоровому росту. Кроме того, сульфат магния положительно влияет на развитие корневой системы и, следовательно, обеспечение растений питательными веществами [14].

Эликсир плодородия uTerra – органическая подкормка; представляет собой питательный раствор, содержащий всё разнообразие агрономически ценных почвенных микроорганизмов из мирового Банка почв uTerra, а также комплекс макро-, микро- и ультрамикроэлементов, который позволяет эффективно снабжать растения полезными веществами. Его присутствие в составе оболочки дражированных семян повышает стрессоустойчивость культур, улучшает их развитие на начальных этапах вегетации, обеспечивает необходимыми минералами, витаминами, аминокислотами и фитогормонами [15].

Материалы и методы эксперимента

В производстве дражированных семян применяются различные технологии, но самым популярным способом является постепенное нанесение оболочки при помощи специализированного аппарата – дражиратора [16].

С учётом особенностей культуры, а также условий произрастания разработаны четыре состава питательной оболочки дражированных семян редиса, компоненты которых представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Компонентный состав оболочки дражированных семян редиса

Вариант эксперимента	Компоненты клеящего раствора	Сухие компоненты
Контроль	Семена без нанесения питательной оболочки	
Состав № 1	3 % раствор картофельного крахмала, органическая подкормка uTerra	Зола, биогумус uTerra, глина, вермикулит, $MgSO_4$
Состав № 2	3 % раствор картофельного крахмала, органическая подкормка uTerra	Зола, биогумус uTerra, глина, перлит, $MgSO_4$
Состав № 3	2,5 % раствор картофельного крахмала, органическая подкормка uTerra	Зола, биогумус uTerra, глина, вермикулит, янтарная кислота, $MgSO_4$
Состав № 4	2,5 % раствор картофельного крахмала, органическая подкормка uTerra	Зола, биогумус uTerra, глина, вермикулит

Процесс дражирования семян редиса в лабораторных условиях состоял из нескольких этапов:

- подготовка семян. Осуществлялся отбор качественных семян, а также их очистка от посторонних примесей;
- приготовление клеящего раствора. Связующим веществом выбран крахмальный раствор, обладающий рядом преимуществ, одним из которых является его натуральность. Он создаёт защитный слой вокруг семян, обеспечивая сохранение влаги и способствуя равномерному прилипанию сухих компонентов;
- нанесение питательной оболочки. Для изготовления образцов использовался дражиратор барабанного типа, работа которого основана на вращении барабана, где происходит равномерное покрытие семян дражирующим составом;
- сушка. После нанесения оболочки, а также просушивания в барабане дражиратора семена сушили при комнатной температуре.

В процессе вращения в камере дражиратора сухие компоненты прилипали к смоченной поверхности семян, образуя оболочку. Чередование нанесения жидких и сухих ингредиентов продолжалось до формирования защитного слоя нужного размера. Заключительным этапом обработки семян стало их высушивание до оптимальной влажности.

Для достижения высокого качества покрытия и сохранения жизнеспособности семян необходимо придерживаться определённых условий процесса. Температура в барабане дражиратора должна составлять около 30 °C, скорость вращения барабана – 40–50 об/мин, температура при окончательной сушке – 18–25 °C, оптимальная влажность воздуха – 40–60 %. Время обработки варьируется от 20 до 30 мин. Указанные параметры могут изменяться в зависимости от типа семян, применяемых компонентов, а также целей обработки.

Результаты эксперимента

В результате лабораторного эксперимента получены четыре образца дражированных семян редиса (рисунок 1).

Рисунок 1 – Образцы семян редиса, полученные в лабораторных условиях (увеличение 10×): а – без оболочки; б – состав № 1; в – состав № 2; г – состав № 3; д – состав № 4

Семена, которые имеют питательную оболочку, как правило, прорастают немного медленнее, чем необработанные, поскольку вода сначала смачивает оболочку и лишь затем проникает к поверхности семян. Однако при правильно подобранном составе, а также при благоприятных условиях задержка в прорастании по сравнению с контрольным образцом минимальна. На рисунках 2 и 3 представлен пророщенный редис на пятый и девятый день после высадки соответственно.

Рисунок 2 – Пророщенный редис на пятый день после высадки

Рисунок 3 – Пророщенный редис на девятый день после высадки

При помощи дражирования достигнуто повышение всхожести, поскольку компоненты оболочки обеспечивают семена необходимыми питательными элементами, а также защищают от болезней и неблагоприятных внешних факторов. Результаты всхожести показаны в таблице 2.

Расчёты проведены исходя из высаженного количества семян каждого образца, которое составило 34 шт.

В таблице 3 представлены морфофизиологические замеры семян, позволяющие оценить их адаптивные возможности и реакции на окружающую среду.

Согласно данным морфофизиологических замеров все варианты семян имеют высокую жизнеспособность, которая превышает 90 %. Этот показатель демонстрирует влияние внешних факторов на быстрое пробуждение и активную вегетацию зародыша растений, а также на возможность эндосперма передавать запасные питательные элементы (белки, жиры и углеводы) для развития молодого растения. Более благоприятно воздействие составов № 1 и 2 (96 и 95 % соответственно).

Нанесение питательной оболочки положительно отражается и на скорости набухания семян редиса, что предполагает быстрое прорастание. Самый высокий показатель наблюдается в образцах с составами № 1 и 2 (0,036 и 0,034 мм/ч соответственно).

Составы стимулируют гормональную систему зародыша; содержание фитогормона увеличивает скорость набухания семян и влагопотребление на ранней стадии прорастания.

В таблице 4 приведены физиологические показатели растений редиса, полученные в ходе эксперимента.

Наибольшая высота наблюдается у растений с составами № 1 и 2 (18,1 и 17,6 см соответственно), что существенно превышает контрольный показатель (10,3 см).

Таблица 2 – Всхожесть семян редиса

Вариант эксперимента	Количество проросших семян, шт.	Всхожесть, %
Контроль	27	79,4
Состав № 1	32	94,1
Состав № 2	30	88,2
Состав № 3	23	67,6
Состав № 4	21	61,8

Таблица 3 – Морфофизиологические замеры семян редиса при прорастании

Вариант эксперимента	Жизнеспособность, %	Скорость набухания, мм/ч	Влагопотребление, мг/ч
Контроль	91	0,026	0,021
Состав № 1	96	0,036	0,049
Состав № 2	95	0,034	0,042
Состав № 3	93	0,033	0,036
Состав № 4	93	0,033	0,038

Таблица 4 – Физиологические показатели растений редиса

Вариант эксперимента	Высота растения, см	Длина корневой системы, см	Среднесуточный прирост, см/сут	Площадь листовой пластины, см^2
Контроль	10,3	15,3	0,69	8,4
Состав № 1	18,1	22,9	1,21	14,6
Состав № 2	17,6	19,2	1,17	14,2
Состав № 3	14,9	17,4	0,99	14,1
Состав № 4	14,5	15,9	0,97	12,8

Благодаря правильно подобранным компонентам происходит быстрое поступление питательных веществ к семенам и ускоренное развитие растений.

Эффективность дражированных семян проявляется и в улучшении формирования корневой системы, что способствует более активному питанию растений. Максимальная длина корней зафиксирована для составов № 1 и 2 (22,9 и 19,2 см соответственно). Развитая и крепкая корневая система повышает устойчивость культур к стрессовым условиям и обеспечивает благоприятное развитие их надземной части.

Анализ данных показывает, что обработка семян составами № 1 и 2 положительно влияет на среднесуточный прирост и площадь листовой пластины по сравнению с контрольным вариантом. Среднесуточный прирост равен 1,21 и 1,17 см/сут соответственно, что в 1,7–1,8 раза больше по сравнению с контролем (0,69 см/сут). Площадь листовой пластины достигла 14,6 и 14,2 см^2 соответственно, что свидетельствует о развитой фотосинтетической поверхности.

В результате эксперимента установлено, что семена, обработанные составами № 1 и 2, продемонстрировали более высокие показатели всхожести, а также наилучшие морфофизиологические и физиологические параметры по сравнению с контрольным образцом. Данные составы обладают оптимальной биологической активностью и потенциалом при использовании в агротехнических целях для увеличения урожайности и ускорения развития растений.

Заключение

Исходя из проведённого анализа, а также из экспериментальных данных по проращиванию дражированных семян редиса можно сделать вывод о целесообразности использования в условиях замкнутой экосистемы питательной оболочки на основе натуральных компонентов.

В процессе исследования предложены четыре состава для дражирования с целью улучшения характеристик семян и повышения эффективности посева. Изготовлены образцы дражированных семян, выполнено их проращивание в грунте. По завершении эксперимента выявлено, что при применении составов № 1 и 2 количество проросших семян по сравнению с контролем увеличилось на 14,7 и 8,8 % соответственно. Следовательно, эти составы положительно влияют на всхожесть.

Таким образом, подбор составов для дражирования – важный аспект агрономии, который позволяет повысить эффективность сельского хозяйства, улучшить качество продукции и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

Список основных источников

1. *Юницкий, А.Э. Особенности проектирования жилого космического кластера «ЭкоКосмоДом» – миссия, цели, назначение / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 51–57.*
2. *Курзенков, С.В. Прогрессивные технологии и оборудование для дражирования семян / С.В. Курзенков, Д.А. Михеев // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21–22 окт. 2015 г.: в 2 т. / Нац. акад. наук Беларуси, РУП «Науч.-практ. центр Нац. акад. наук Беларуси по механизации сел. хоз-ва»; редкол.: П.П. Казакевич (гл. ред.), С.Н. Поникарчик. – Минск, 2015. – Т. 2. – С. 123–129.*
3. *Михеев, Д.А. Исследование посевных качеств инкрустированных семян рапса, полученных в центробежном*

дражираторе с лопастным отражателем / Д.А. Михеев, В.Н. Исаченко // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 2. – С. 144–147.

4. *Перспективные препараты для инкрустирования семян столовых корнеплодов / Ю.А. Быковский, А.В. Янченко, М.И. Азопков [и др.] // Картофель и овощи. – 2018. – № 5. – С. 16–19.*
5. *Сысоев, А.А. О классификации способов предпосевной обработки семян и дражираторов / А.А. Сысоев, Д.А. Михеев // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. / редкол.: В.В. Гусаров [и др.]. – Горки, 2023. – Вып. 8. – С. 343–349.*
6. *Михеев, Д.А. Исследование нанесения сухого порошка на основе бентонитовой глины на поверхность семян сахарной свёклы при дражировании / Д.А. Михеев // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 2. – С. 181–185.*
7. *Копытков, В.В. Исследования технологии получения дражированных семян с использованием композиционных полимерных препаратов / В.В. Копытков, В.Н. Коновалов // Лесной журнал. – 2016. – № 4. – С. 30–39.*
8. *Харина, А.В. Древесная зола как источник питательных веществ для растений / А.В. Харина // Научный журнал молодых учёных. – 2019. – № 4. – С. 11–14.*
9. *Биоутилизация органических остатков при помощи микроорганизмов / А.Э. Юницкий, Т.И. Пятакова, К.А. Бойко, И.В. Налетов // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 390–399.*
10. *Действие органоминеральных суспензий и наносуспензий на структуру урожая и содержание зольных элементов / И.М. Суханова, И.А. Яппаров, Р.Р. Газизов [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2018. – № 2. – С. 23–34.*
11. *Ахияров, Б.Г. Использование вермикулита при выращивании рассады овощных культур / Б.Г. Ахияров, Р.Р. Исмагилов, Р.Р. Рахимов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2015. – № 3 (53). – С. 67–70.*
12. *Михеев, Д.А. Сушка семян рапса с искусственной оболочкой на основе бентонитовой глины / Д.А. Михеев, А.А. Сысоев // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 2. – С. 165–170.*
13. *Предпосевная обработка семян стимуляторами роста в сверхмалых дозах / Н.А. Цыганова, Н.А. Воронкова, В.Д. Дороненко, В.А. Волкова // Применение химических веществ, ионизирующих и неионизирующих излучений в агробиотехнологиях: сб. докл. кругл. стола в рамках XX Менделеев. съезда по общ. и прикладной химии, Москва, 21 сент. 2016 г. / ФГБНУ ВНИИРАЭ. – М. [и др.], 2016. – С. 37–40.*
14. *Неверов, А.А. Стимулирующий эффект сульфата магния на стадии прорастания семян сельскохозяйственных культур / А.А. Неверов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2021. – № 1 (87). – С. 74–78.*
15. *Технологические системы для культивирования растений в ЭкоКосмоДоме / А.Э. Юницкий, Н.С. Зыль, Д.А. Конёк, М.М. Парфенчик // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 336–347.*
16. *Андреев, С.А. Экспериментальные исследования дражирования семян в барабанном дражираторе / С.А. Андреев // Агроинженерия. – 2022. – Т. 24, № 5. – С. 16–23.*

УДК 635.64+629.7

Гумусопоника как перспективный метод выращивания томата обыкновенного в ЭкоКосмоДоме

А.Э. Юницкий[1,2]
доктор философии транспорта

Е.А. Крюков[2]

М.М. Парфенчик[2]

А.М. Павлюченко[2]

Е.В. Шерешовец[2]

[1] ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

[2] ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

Проведён сравнительный анализ двух перспективных методов беспочвенного культивирования томата обыкновенного (*Solanum lycopersicum* L.): традиционного способа, предусматривающего применение жидкой минеральной питательной среды, и инновационной гумусопоники, объединяющей преимущества минерального питания с биостимулирующим действием гуминовых веществ и агрономически ценных бактериальных ассоциаций.

В ходе эксперимента выявлено, что при использовании гумусопоники значительно улучшаются показатели вегетативного роста культуры и повышается среднесуточный прирост. Установлено, что эликсир плодородия uTerra в качестве органической составляющей способствует ускорению фенологического развития, увеличению средней массы плодов на 25,8 % при стабильно высоком содержании растворимых сахаров. Не менее важным оказался выраженный фитопротекторный эффект технологии – отсутствие видимых симптомов заболеваний при наличии патологической нагрузки в контрольной группе, что свидетельствует о стимуляции естественного иммунитета растений. Сравнение проводилось с питательной средой, которая в настоящее время считается оптимальной для беспочвенного культивирования томатов.

Полученные результаты подтверждают целесообразность внедрения гумусопоники как экологически ориентированной и экономически эффективной технологии для защищённого грунта, сочетающей высокую урожайность с улучшением качества продукции и повышением иммунитета растений.

Описанный подход представляет интерес для использования в замкнутых экологических системах, включая ЭкоКосмоДом, где большое значение имеют оптимизация пространства и совершенствование технологий выращивания сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова:
гуминовые вещества, гумусопоника, продуктивность, томат обыкновенный (Solanum lycopersicum L.), фенология.

UDC 635.64+629.7

Humusoponics as a Promising Method for Cultivating Tomato in EcoCosmoHouse

A. Unitsky[1, 2]
Dr. of Philosophy
in Information Technologies
(Transport)

Y. Krukau[2]

M. Parfenchik[2]

A. Pauliuchenka[2]

A. Sharashovets[2]

[1] Astroengineering Technologies LLC, Minsk, Belarus

[2] Unitsky String Technologies Inc., Minsk, Belarus

A comparative analysis was conducted of two promising soilless cultivation methods for tomato (*Solanum lycopersicum* L.): the conventional approach based on the use of a liquid mineral nutrient solution, and the innovative approach of humusoponics, which combines the advantages of mineral nutrition with the biostimulatory effects of humic substances and agronomically valuable bacterial associations.

The experiment revealed significant benefits of humusoponics, including enhanced vegetative growth and increased average daily growth rate. It was established that the uTerra fertility elixir, used as an organic component, promotes accelerated phenological development and increases the average fruit weight by 25.8 % while maintaining consistently high soluble sugar content. Equally important was the pronounced phytoprotective effect of the technology: the absence of visible disease symptoms under pathogen pressure observed in the control group indicates stimulation of the plants' natural immunity. The comparison was carried out against a nutrient solution currently considered optimal for soilless tomato cultivation.

The obtained results confirm the feasibility of implementing humusoponics as an environmentally oriented and economically efficient technology for greenhouse cultivation, combining high yield with improved product quality and enhanced plant immunity.

The described approach is of interest for application in closed ecological systems, including the EcoCosmoHouse, where spatial optimization and the advancement of crop cultivation technologies are of key importance.

Keywords:
humic substances, humusoponics, phenology, productivity, tomato (Solanum lycopersicum L.).

Введение

Томат обыкновенный (*Solanum lycopersicum* L.) – одно из наиболее ценных продовольственных растений, занимающее существенное место в рационе человека благодаря высокому содержанию витаминов, антиоксидантов (ликопина) и других биологически активных веществ. Эта культура характеризуется интенсивными темпами роста, высокой продуктивностью, а также значительным потреблением воды и минеральных элементов, что делает её требовательной к условиям выращивания.

В ЭкоКосмоДоме (ЭКД) [1] необходимо применение высокоэффективных и устойчивых агротехнологий, способных обеспечивать стабильный результ при минимальных ресурсах в ограниченном пространстве. Однако почвенное выращивание часто сопряжено с нерациональным расходованием воды и площадей [2]. Кроме того, в ЭКД критически важны замкнутость экологического цикла и максимальная продуктивность, следовательно, технологии с использованием биостимулирующих добавок представляют особый интерес, поскольку ускоряют рост культур и поддерживают биологический баланс в замкнутой среде.

В связи с вышеизложенным перспективной альтернативой является беспочвенный метод выращивания – гумусопоника, сочетающая преимущества культивирования на жидких питательных средах с включением органического компонента на основе гумуса и агрономически ценных микроорганизмов. В отличие от классических способов, где преимущественно применяются минеральные элементы [3], в гумусопонике питательная среда дополняется органической составляющей на основе эликсира плодородия uTerra, содержащего гуминовые вещества (ГВ), витамины, агрономически ценные бактериальные ассоциации и другие биологически активные компоненты [4]. Этот подход обеспечивает экологичность, биодоступность элементов и возможность точного контроля состава питательной среды, что позволяет оптимизировать рост культур и улучшать качество урожая.

ГВ образуются в результате естественного разложения растительной и животной массы, а также вследствие микробного метаболизма и обладают высокой устойчивостью к биохимической деградации. Многочисленные научные работы подтверждают, что гуминовые кислоты (ГК), выделенные из ископаемого сырья (торф, бурый уголь), по своим свойствам аналогичны почвенным и оказывают комплексный стимулирующий эффект на растения. Технология получения данных веществ основана на щелочной экстракции, в процессе которой образуются гуматы – водорастворимые соли с выраженным физиологическим действием.

Наибольшей биологической активностью среди компонентов ГВ обладают ГК, особенно их низкомолекулярные фракции, растворимые в воде при нейтральных и слабощелочных значениях pH [5]. Эти соединения выполняют регулятивные функции в растительном организме, выступая главными участниками биохимических и физиологических процессов.

Исследования с применением современных методов анализа, включая изотопное мечение (^{15}N, ^{32}P, ^{65}Zn) и ЭПР-спектроскопию, выявили, что ГК действуют как эффективные редокс-активные системы, участвующие в электрон-транспортных цепях в митохондриальных реакциях. Спектроскопия подтверждает наличие стабильных семихинонных радикалов в структуре ГК [6], что объясняет их уникальные окислительно-восстановительные свойства.

Определённый интерес представляет способность данных веществ регулировать ионный гомеостаз растений. Благодаря наличию хелатирующих карбоксильных и фенольных групп, ГК образуют устойчивые комплексы с катионами (Ca^{2+}, $Fe^{2+/3+}$, Cu^{2+}), существенно влияя на их биодоступность. Изотопные исследования (^{42}Ca, ^{86}Rb) демонстрируют, что ГК увеличивают скорость транспорта ионов через мембраны на 50–60 %. Внесение таких кислот повышает ёмкость катионного обмена субстрата на 15–20 %, предотвращая дисбаланс минерального питания.

Значительное влияние ГВ оказывают на ризосферные процессы [7], стимулируя колонизацию корневой зоны симбиотическими микроорганизмами (*Pseudomonas* и *Bacillus* spp.), что приводит к усилению азотфиксации и фосфатмобилизации. В частности, в опытах с томатами при обработке гуминовыми препаратами отмечалось увеличение на 30 % численности PGPR (plant growth-promoting rhizobacteria).

Большого внимания заслуживает адаптогенный потенциал ГК [5], который заключается в их способности повышать толерантность растений к различным абиотическим стрессам. В условиях температурных колебаний такие вещества обеспечивают стабилизацию мембранных липидов за счёт взаимодействия с фосфолипидами [5]. При влиянии тяжёлых металлов ГК составляют с ними устойчивые комплексы, снижая аккумуляцию токсичных элементов в побегах [8]. При засолении (100 мМ NaCl) данные кислоты стимулируют синтез осмопротекторов (пролина и глицин-бетаина), что приводит к увеличению биомассы корней на 25 % по сравнению с контрольными растениями [5].

Таким образом, комплексное действие ГВ на растительный организм включает как прямое (через редокс-активность и ионный транспорт), так и опосредованное (через улучшение ризосферных условий и повышение

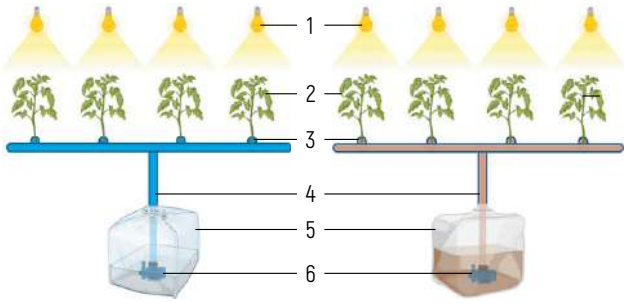
стрессоустойчивости) влияние на биохимические процессы. Эти свойства делают ГВ перспективным компонентом современных агротехнологий, в том числе альтернативных беспочвенных способов выращивания.

Целью настоящего исследования является сравнительный анализ эффективности гумусопоники – инновационного метода культивирования растений, сочетающего применение агрономически ценных почвенных микроорганизмов, гуминовых веществ, минеральных солей, – и традиционной гидропонной системы в отношении влияния на ростовые параметры и продуктивность томата обыкновенного.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выбран томат сорта Красная шапочка ввиду его компактности и ранних сроков созревания. Семена проращивали отдельно до стадии формирования трёх настоящих листьев, после чего растения пересаживали в экспериментальную систему.

Культивирование проводили в теплице с капельным поливом (рисунок 1). Субстратом служили брикеты из стекловолокна, обеспечивающие стабильное укоренение и минимизацию внешнего влияния. Температурный режим поддерживали в диапазоне 23–26 °С,что является оптимальным условием для вегетации томата. Агроклиматические параметры (освещение, влажность, проветривание) соответствовали стандартным протоколам для выращивания томата обыкновенного на жидких питательных средах [8].



а) б)

Рисунок 1 – Схема эксперимента по влиянию гумусопоники на рост и развитие томата обыкновенного:
а – контроль; б – гумусопоника;
1 – освещение; 2 – растение; 3 – брикет из стекловолокна;
4 – система подачи питательного раствора;
5 – резервуар с питательным раствором;
6 – водяной насос

В качестве питательной среды для выращивания томатов в контрольной группе использовался следующий состав: нитрат калия (KNO_3) – 1–1,5 г/л; нитрат кальция ($Ca(NO_3)_2$) – 1,2–1,8 г/л; сульфат магния ($MgSO_4$) – 0,5–0,7 г/л; монокалийфосфат (KH_2PO_4) – 0,3–0,5 г/л; сульфат калия (K_2SO_4) – 0,5–0,7 г/л; цитрат железа ($FeC_6H_5O_7$) – 0,05 г/л; сульфат марганца ($MnSO_4$) – 2–5 мг/л; бура ($Na_2B_4O_7$) – 2–3 мг/л; сульфат цинка ($ZnSO_4$) – 0,5–1 мг/л; сульфат меди ($CuSO_4$) – 0,5–1 мг/л. Для опытного варианта применялся аналогичный состав с добавлением эликсира плодородия uTerra в концентрации 1 мл/л.

Каждый эксперимент проводили в четырёхкратной повторности. Оценку ростовых и физиологических параметров (высота растений, переходы фенофаз, урожайность) выполняли через равные временные интервалы.

Результаты эксперимента

При использовании гумусопоники наблюдались лучшие результаты роста и развития культуры по сравнению с контрольной группой. В таблице 1 представлены данные замеров высоты томата обыкновенного. Измерения проводились на ключевых стадиях онтогенеза, соответствующих активному вегетативному росту (22–37-е сутки), началу цветения и формирования завязей (54–61-е сутки) и созреванию плодов (68–82-е сутки).

Таблица 1 – Влияние метода гумусопоники на высоту растений томата обыкновенного, см

Вариант эксперимента	День вегетации						
	22-й	28-й	37-й	54-й	61-й	68-й	82-й
Контроль							
1	13,5	17	25	35	44,5	50	54
2	13	19	27	37	46	53	54
3	14	18	27	36	45,5	50	50
4	8,5	11	21	31	43	55	55
Средний показатель	12,3	16,3	25	34,8	44,8	52	53,3
Гумусопоника							
1	11	18	26	38	52	58	58
2	10,5	16	27	39	50	54	55
3	8,5	17	28	41	50	54	56
4	9	16,5	27	40	50	53,5	66
Средний показатель	9,8	16,9	27	39,5	50,5	54,9	58,8

При применении метода гумусопоники наблюдалось увеличение максимальной высоты растения на 10,3 %. Так, средний показатель в контрольной группе составил 53,3 см, а в исследуемой – 58,8 см, что говорит о большей стимуляции роста вегетативной массы.

На основе мониторинга данных составлена диаграмма изменения среднесуточного прироста культуры (рисунок 2).

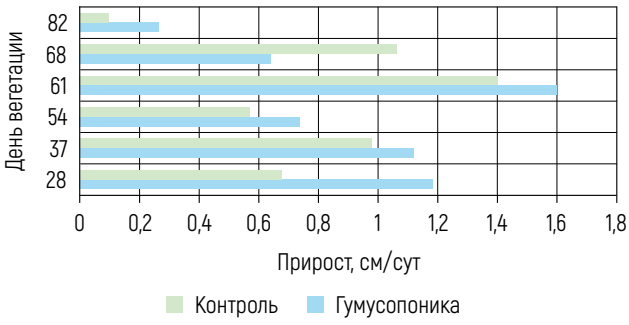


Рисунок 2 – Динамика среднесуточного прироста томата обыкновенного

Максимальный прирост у обоих вариантов зафиксирован на 61-й день вегетации и составил 1,4 см/сут для контроля и 1,6 см/сут для гумусопоники. Следует отметить, что с 28-го по 61-й день значения прироста на гумусопонике превалировали над таковыми в контроле. В дальнейшем рост замедлялся в связи с достижением пределов генетического потенциала томата обыкновенного в данных условиях культивирования. Этот переход сопровождается снижением активности ростовых процессов и перераспределением потоков питательных веществ в пользу формирующихся генеративных органов. В варианте с гумусопоникой он происходил при больших абсолютных размерах растений, что свидетельствует о высокой степени реализации сортового потенциала.

На рисунке 3 представлены фотографии томата обыкновенного, сделанные во время исследования.

На протяжении вегетационного периода растения томата демонстрировали стабильный и равномерный рост во всех вариантах опыта. При применении гумусопонной технологии визуально наблюдался более объёмный габитус. В процессе мониторинга обнаружено присутствие патологической нагрузки в контрольной группе, что отмечалось локальным некротическим поражением вегетативных органов. При использовании гумусопоники видимых очагов не найдено, это может быть связано с комплексным стимулирующим действием на иммунитет растений органической составляющей.

Рисунок 3 – Рост и развитие томата обыкновенного:
а – 15-й день вегетации; б – 46-й день вегетации

Стоит отметить различия в переходах фаз у томата обыкновенного (таблица 2). В исследуемой группе выявлено самое раннее цветение, что способствовало скорейшему завязыванию плодов, а значит, сокращению сроков получения урожая. Начало цветения растений, культивированных на гумусопонике, наступило на 34–35-е сутки против 38–40-х в контроле, а плодоношение – на 45–48-е сутки против 52–54-х в контроле.

Таблица 2 – Длительность перехода фенофаз, урожайность и качество полученной продукции

Вариант эксперимента	Начало цветения, сутки	Начало плодоношения, сутки	Масса плодов, г	Общее число сахаров в плодах, %
Контроль				
1	39	54	438	1,03
2	38	52	496	1,34
3	39	52	415	0,94
4	40	53	395	1,53
Гумусопоника				
1	35	48	504	0,98
2	34	45	589	1,4
3	35	46	654	1,44
4	34	45	603	1,23

Средняя масса плодов при использовании гумусопоники достигла 587,5 г, что на 25,8 % превышает аналогичный показатель в контрольной группе. Наибольшая масса плодов для контроля составила 496 г, для гумусопоники – 654 г.

Анализ содержания сахаров выявил, что в трёх из четырёх исследуемых вариантов гумусопоники данный параметр находился в диапазоне 1,23–1,44 %, демонстрируя существенное преимущество перед контрольной группой (0,94–1,53 %).

Заключение

Результаты эксперимента подтвердили: для выращивания томата сорта Красная шапочка питательная среда с добавлением эликсира плодородия uTerra имеет значительное преимущество по сравнению со стандартным раствором. Можно сделать вывод, что применение органической составляющей обеспечивает комплексное улучшение всех исследуемых параметров роста и развития культуры.

Для варианта опыта с использованием гумусопоники установлено ускорение вегетации: средняя высота растений достигла 58,8 см, что на 10,3 % превысило контрольные показатели (53,3 см). Максимальный прирост составлял 1,6 см/сут, демонстрируя преимущество в 14,3 % перед контрольной группой (1,4 см/сут). Особенно важно отметить, что в исследуемом варианте переход к генеративной фазе осуществлялся при сохранении высоких темпов вегетативного роста, что говорит о более полной реализации генетического потенциала культуры.

Гумусопоника способствовала и ускоренному прохождению ключевых фенофаз: по сравнению с контролем начало цветения наступало раньше на 4–5 суток, а плодоношение – на 7–9 суток, что позволяет существенно сократить производственный цикл. Средняя масса плодов увеличилась на 25,8 %, при этом биохимические показатели качества оставались стабильно высокими (содержание сахаров 1,23–1,44 %).

Отсутствие видимых симптомов заболеваний в исследуемом варианте при наличии поражений в контроле свидетельствует о стимулирующем действии органической составляющей гумусопоники на иммунный статус растений.

Экономическая эффективность рассмотренного метода культивирования обусловлена комплексом факторов: сокращением сроков получения урожая, увеличением выхода товарной продукции, снижением затрат на средства защиты растений и повышением качественных характеристик выращенных плодов.

Таким образом, гумусопоника представляет собой перспективное направление развития современных технологий защищённого грунта, успешно сочетающее высокую продуктивность с экологической безопасностью производства, что позволяет использовать её потенциал в условиях ЭКД.

Список основных источников

1. *Юницкий, А.Э. Особенности проектирования жилого космического кластера «ЭкоКосмоДом» – миссия, цели, назначение / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 51–57.*
2. *Resh, H.M. Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower / H.M. Resh. – 8th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2022. – 580 p.*
3. *Ямов, П.С. Гидропоника / П.С. Ямов // Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения: сб. материалов LV студенч. науч.-практ. конф., Тюмень, 17–19 марта 2021 г.: в 2 ч. – Тюмень, 2021. – Ч. 2. – С. 743–746.*
4. *Юницкий, А.Э. Гумусопоника как метод выращивания сельскохозяйственной продукции в условиях ЭкоКосмоДома / А.Э. Юницкий, Е.В. Шерешовец, В.В. Корней // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. – Минск, 2024. – С. 348–357.*
5. *Humic and Fulvic Acids as Biostimulants in Horticulture / L.P. Canellas, F.L. Olivares, N.O. Aguiar [et al.] // Scientia Horticulturae. – 2015. – Vol. 196. – P. 15–27.*
6. *Carbon Sequestration in Soil by in Situ Catalyzed Photo-Oxidative Polymerization of Soil Organic Matter / A. Piccolo, R. Spaccini, A. Nebbioso, P. Mazzei // Environmental Science & Technology. – 2011. – Vol. 45, iss. 15. – P. 6697–6702.*
7. *Nutrient Stripping: The Global Disparity Between Food Security and Soil Nutrient Stocks / D.L. Jones, P. Cross, P.J.A. Withers [et al.] // Journal of Applied Ecology. – 2013. – Vol. 50, iss. 4. – P. 851–862.*
8. *Humic Acid Reduces the Available Cadmium, Copper, Lead, and Zinc in Soil and Their Uptake by Tobacco / Q. Rong, K. Zhong, H. Huang [et al.] // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, iss. 3. – 1077.*

УДК 58.02+629.7

Подбор субстрата для выращивания микрозелени в условиях замкнутой экосистемы ЭкоКосмоДома

А.Э. Юницкий[1, 2]
доктор философии транспорта

И.В. Налетов[2]

В.С. Заяц[2]

К.А. Бойко[2]

[1] ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

[2] ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

Исследована эффективность культивирования микрозелени амаранта овощного (*Amaranthus hypochondriacus* L.) на различных видах субстрата для дальнейшего применения в ЭкоКосмоДоме. Цель работы – создать оптимальный субстрат для выращивания микрозелени в условиях замкнутой экосистемы, используя традиционные и инновационные компоненты.

Эксперименты показали, что субстрат на основе льнотресты способствует не только повышению урожайности, но и улучшению качества растительной продукции. Кроме того, изучено влияние подкормки жидкой органической комплексной uTerra на биохимический состав растений. Определено содержание общего количества сахаров, нитратов, калия и фосфора. Описана возможность использования эликсира плодородия uTerra для достижения максимального урожая, обеспечения его высокого качества и, как следствие, получения сбалансированного рациона органического питания человека в условиях замкнутой экосистемы биосферного типа.

Ключевые слова:
амарант овощной (Amaranthus hypochondriacus L.), замкнутая экосистема, микрозелень, субстрат, ЭкоКосмоДом (ЭКД), эликсир плодородия uTerra.

UDC 58.02+629.7

Selection of Substrate for Growing Microgreens in Closed Ecosystem of EcoCosmoHouse

A. Unitsky[1, 2]
Dr. of Philosophy
in Information Technologies
(Transport)

I. Naletov[2]

V. Zayats[2]

K. Boiko[2]

[1] Astroengineering Technologies LLC,
Minsk, Belarus

[2] Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

The study explored the effectiveness of cultivating vegetable amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.) microgreens on different types of substrates for future use in the EcoCosmoHouse. The aim of the study was to create an optimal substrate for growing microgreens in a closed ecosystem using a mix of traditional and innovative components.

The experiments revealed that a substrate based on flax shives not only boosts yields but also improves the quality of the plant products. The paper examined how the uTerra liquid organic fertilizer affects the biochemical composition of the plants. The total content of sugars, nitrates, potassium, and phosphorus was measured. The results suggest that using the uTerra fertility elixir can help achieve maximum yield and high quality, contributing to a balanced organic diet for people living in a closed biosphere-type ecosystem.

Keywords:
closed ecosystem, EcoCosmoHouse (ECH), microgreens, substrate, uTerra fertility elixir, vegetable amaranth (Amaranthus hypochondriacus L.).

Введение

В настоящее время наблюдается растущий интерес к устойчивым методам ведения сельского хозяйства, особенно в условиях ограниченного пространства и ресурсов. Состав почв постоянно ухудшается вследствие нерациональной деятельности человека. Интенсивное земледелие, использование химических удобрений и пестицидов, а также истощение земель приводят к снижению плодородия почв и качества выращиваемых культур. Это особенно критично в том числе и для кормовой базы. Нехватка в кормах необходимых питательных веществ негативно отражается на продукции животного происхождения, такой как мясо, молоко и яйца, способна привести к уменьшению продуктивности животных, увеличению заболеваемости и в результате – к экономическим потерям [1].

В этих условиях отмечается особая потребность в разработке и внедрении новых технологий, позволяющих получать высококачественные сельскохозяйственные культуры без ущерба для окружающей среды. Нужен переход к более экологичным и щадящим методам выращивания фруктов, овощей и другой растительной продукции.

Одним из направлений решения данных проблем может быть применение безотходного компактного культивирования микрозелени для обеспечения зелёным кормом сельскохозяйственных животных. В качестве основного компонента их питательной базы, как в условиях замкнутых экосистем, так и на современных фермах, предлагается микрозелень, выращенная на экологичных и съедобных субстратах.

Микрозелень – молодые растения, уборка которых производится сразу после того, как семядольные листья развились с одним набором настоящих листьев (7–15 дней). На этой стадии они более насыщены питательными веществами, чем непророщенные семена или зрелые овощи. Микрозелень также богата белками, пищевыми волокнами [2]. Она дополняет рацион ценными незаменимыми аминокислотами, минералами в усвояемой форме (кальций, магний, калий, фосфор, натрий, железо, селен и др.), витаминами (аскорбиновая кислота, альфа-токоферол, бета-каротин и др.) [3].

Научные исследования в области выращивания микрозелени в основном направлены на разработку и применение синтетических субстратов или бессубстратного способа. Однако процесс отделения синтетического субстрата от микрозелени вызывает дополнительные затраты. Кроме того, в данном случае корневая биомасса не используется в качестве корма для животных. Бессубстратный способ подходит для ограниченного количества культур и требует высокой плотности посадки семян, что снижает общую эффективность процесса; съедобный субстрат для животных при этом также не образуется [4]. В настоящей статье описаны эксперименты по применению органических субстратов (переработанная базидиальными грибами льнотреста, солома), которые скармливаются животным вместе с выращенной на них микрозеленью. Уделено внимание эликсиру плодородия uTerra, который используется при поливе растений как стимулятор роста и позволяет активизировать ферментацию субстрата, улучшить характеристики микрозелени, а также повысить её биологическую ценность. В качестве модельного организма выбран амарант овощной (*Amaranthus hypochondriacus* L.) – одна из перспективных сельскохозяйственных культур с уникальным составом незаменимых аминокислот, витаминов, макро- и микроэлементов.

Таким образом, комплексный подход во включении микрозелени в корм для животных позволит увеличить эффективность её выращивания, подобрать оптимальный субстрат, а также снизить дефицит витаминов, пищеварительных ферментов, макро-, микро- и ультрамикроэлементов, заложить научную базу для круглогодичного обеспечения животных зелёным кормом в замкнутых экосистемах.

Материалы и методы исследования

В процессе исследовательских работ по селекции амаранта овощного специалистами отдела биотехнологий ЗАО «Струнные технологии» (г. Минск, Беларусь) оценивались различные сорта по физиологическим признакам (размер семян, форма и размер листьев, высота растения, устойчивость к болезням), а также по питательной ценности и содержанию белка. При выборе сортов, подходящих для выращивания до стадии микрозелени, следует опираться на биохимический состав взрослых культур. Так, особое значение имеет содержание витаминов, антиоксидантных соединений, аскорбиновой кислоты, каротиноидов, филлохинона, токоферолов и микроэлементов (цинк, сера, селен, медь, марганец, магний, фосфор, железо, калий). С учётом потенциального содержания белка и высокой скорости роста в качестве оптимального сорта для культивирования микрозелени признан Крепыш (семена получены в Крестьянском (фермерском) хозяйстве «Юницкого» (г. Марьина Горка, Беларусь) в 2024 г.) [5].

При анализе качества семян определяли:

- энергию прорастания (по ГОСТ 12038-84);
- лабораторную всхожесть (по ГОСТ 12038-84);
- бактериальную нагрузку (по ГОСТ 12044-93);
- грибную нагрузку (по ГОСТ 12044-93).

При анализе качества субстрата и микрозелени определяли:

- бактериальную нагрузку (по ГОСТ 12044-93);
- грибную нагрузку (по ГОСТ 12044-93);
- количество нитратов (по СТБ 17.13.05-28-2014);
- содержание сухого вещества (по ГОСТ 33977-2016);
- содержание общего азота (по ГОСТ Р 58596-2019);
- содержание общего фосфора (по ГОСТ 26207-91);
- содержание общего калия (по ГОСТ 26207-91);
- pH (по СТБ 17.13.05-36-2015).

Физиологическая оценка выполнялась способом фотофиксации на каждом этапе развития. Рассматривались показатели прорастания и равномерности роста.

В ходе биохимического анализа определяли содержание общего количества сахаров, применяя колориметрический метод, основанный на изменении интенсивности окраски раствора глицерата меди при его кипячении с вытяжками.

Экспериментальная часть

Подбор питательного субстрата

С целью эффективного выращивания микрозелени и оценки её питательной ценности создано несколько съедобных субстратов: измельчённая солома и переработанная базидиальными грибами льнотреста. Главные критерии выбора – влияние на прорастание семян (инертность или стимуляция), а также отсутствие необходимости срезания ростков микрозелени (весь субстрат с корневой массой может употребляться животными в пищу). Кроме того, солома является универсальным материалом, получаемым в процессе переработки злаковых культур. Льнотреста образуется как вторичный продукт при производстве льноволокна. В нашем варианте исследования льнотреста используется после роста на ней базидиальных грибов (происходит частичная деструкция).

Субстрат на основе соломы. На рисунке 1 представлена схема получения микрозелени амаранта овощного на субстрате из измельчённой соломы.

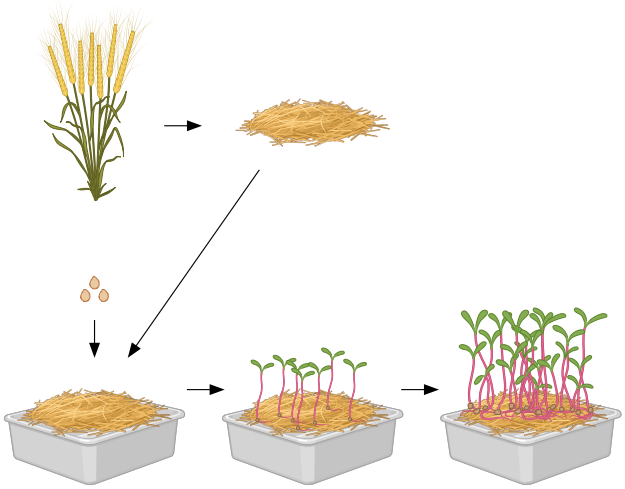


Рисунок 1 – Схема получения микрозелени амаранта овощного на субстрате из соломы

Этапы производства микрозелени:

1) высушивание соломы при 25–30 °C и измельчение до размера 1–3 см в длину;

2) внесение готового субстрата слоем 2–3 см в пластиковый контейнер;

3) внесение семян исходя из нормы 7 г/м^2;

4) наблюдение за прорастанием и фенофазами;

5) ежедневный полив после прорастания (контрольный вариант – вода; опытный вариант – вода + uTerra).

До момента прорастания семян (трое суток) контейнеры держали закрытыми, проветривая несколько раз в день. Микрозелень выращивали на стеллажах при 14-часовом световом периоде.

Готовой микрозеленью амаранта овощного считаются растения высотой 5–6 см.

Субстрат на основе льнотресты. На рисунке 2 представлена схема получения микрозелени амаранта овощного на субстрате из льнотресты.

Этапы производства микрозелени:

1) высушивание льнотресты при 25–30 °C и измельчение до размера 1–3 см в длину;

2) внесение готового субстрата слоем 2–3 см в пластиковый контейнер;

3) внесение семян исходя из нормы 7 г/м^2;

4) наблюдение за прорастанием и фенофазами;

5) ежедневный полив после прорастания (контрольный вариант – вода; опытный вариант – вода + uTerra).

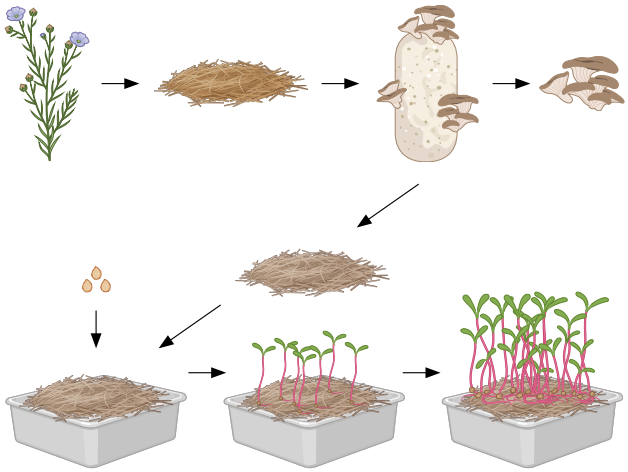


Рисунок 2 – Схема получения микрозелени амаранта овощного на субстрате из льнотресты

Готовой микрозеленью амаранта овощного считаются растения высотой 5–6 см.

Результаты экспериментов и оценка качества полученной микрозелени

Семена амаранта овощного сорта Крепыш проанализированы по таким показателям, как энергия прорастания, всхожесть, бактериальная и грибная нагрузка. Для оценки энергии прорастания и всхожести по ГОСТ применялись следующие условия: ложе – гофрированная фильтровальная бумага, переменная температура 20–30 °С (6 ч поддерживалась повышенная температура, 18 ч – пониженная). Семена предварительно промывались в проточной воде при 25 °С 1–2 ч и просушивались при 25 °С. Проращивание проводилось без освещения. Результаты опыта отражены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты анализа качества семян амаранта овощного сорта Крепыш

Показатель	Значение
Проросшие, шт.	46
Непроросшие, шт.	4
Невсхожие, шт.	0
Всхожесть, %	92
Энергия прорастания, %	87
Грибная нагрузка, %	3 (слабая)
Бактериальная нагрузка, %	2 (слабая)

Всхожесть составила 92 %, энергия прорастания – 87 %, что является высоким показателем и говорит о равномерной всхожести проростков. Патогенная нагрузка в проверяемых образцах минимальная (2–3 %) [6]. Значит, качество семян по исследуемым параметрам оказалось допустимым для выращивания микрозелени и дальнейшего проведения экспериментов.

При подборе субстрата для культивирования микрозелени выполнялась аналитика по двум вариантам (солома, льнотреста) с целью определения оптимального состава.

Субстрат на основе соломы. В таблице 2 представлены этапы получения микрозелени амаранта овощного на субстрате из измельчённой соломы. Эксперимент проводился согласно разработанной схеме.

Таблица 2 – Выращивание микрозелени амаранта овощного на субстрате из соломы

Фото	Описание
	5-й день. Прорастание, появление корешка. Неравномерное формирование корешка. Всхожесть семян – 80 %
	7-й день. Неравномерное появление зародышевого побега
	10-й день. Появление зародышевого побега с семядольными листьями
	11-й день. Сформированная микрозелень. Доминирует антоциановая окраска. Высота 5 см

Исходя из данных таблицы 2, на измельчённой соломе наблюдались всхожесть семян на уровне 80 %, неравномерный переход фаз; срок получения готовой продукции составил 11 дней.

Субстрат на основе льнотресты. В таблице 3 представлены этапы получения микрозелени амаранта овощного на субстрате из льнотресты.

Таблица 3 – Выращивание микрозелени амаранта овощного на субстрате из льнотресты

Фото	Описание
	3-й день. Прорастание, появление корешка. Всхожесть семян – 100 %. Быстрое появление всходов
	4-й день. Появление зародышевого побега. Равномерное быстрое формирование побега. Окраска антоциановая
	6-й день. Появление зародышевого побега с семядольными листьями
	8-й день. Сформированная микрозелень. Равномерный рост. Доминирует антоциановая окраска. Высота 5,5 см

Как показано в таблице 3, выращивание микрозелени на субстрате из льнотресты даёт более стабильные и качественные результаты, чем на соломе. Все растения амаранта овощного достигли товарного вида на восьмой день и пригодны для употребления. В обоих вариантах исследования не обнаружено бактериальной и грибной нагрузки.

Наилучший рост микрозелени отмечен на субстрате из переработанной базидиальными грибами льнотресты. Поскольку он выбран для выращивания микрозелени амаранта овощного, то были проведены дополнительные химические и биохимические анализы этого субстрата и ростков микрозелени, полив которых осуществлялся с использованием воды и жидкой подкормки для растений uTerra (рисунок 3).

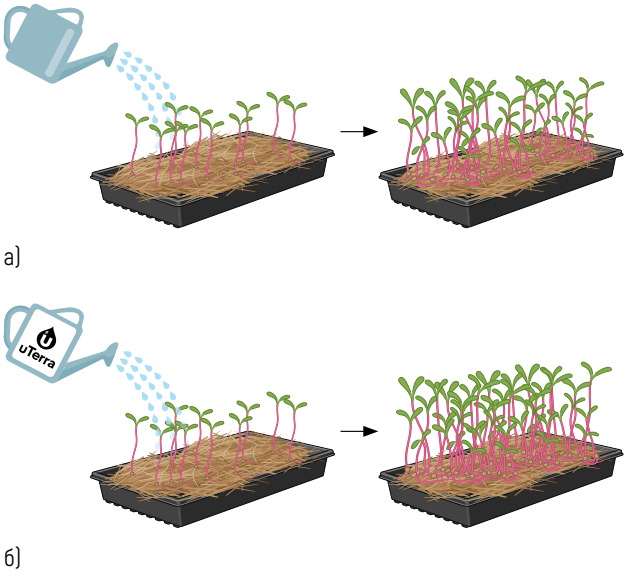


Рисунок 3 – Схема опыта по выращиванию микрозелени амаранта овощного с применением: а – воды; б – воды и жидкой подкормки для растений uTerra

На этапе сбора микрозелени анализировались образцы субстрата на основе переработанной базидиальными грибами льнотресты (субстрат на воде; субстрат на воде + uTerra), а также выращенной микрозелени амаранта овощного (микрозелень на воде; микрозелень на воде + uTerra). В таблице 4 представлены полученные результаты.

Как видно из приведённых данных, общее число микроорганизмов в вариантах с эликсиром плодородия uTerra выше, чем в вариантах с водой: в 1,5 раза для субстрата и в три раза для микрозелени. Показатели общего фосфора и калия также возросли при использовании подкормки. Для субстрата содержание азота уменьшилось на 47,7 %, фосфора возросло на 120,1 %, а калия – на 95,2 % по сравнению с поливом чистой водой. Для микрозелени содержание азота снизилось на 16,6 %, фосфора увеличилось на 25,3 %, а калия – на 18,7 % по сравнению с контролем.

Таблица 4 – Результаты биохимических и химических анализов в ходе эксперимента

Образец	КОЕ/г	Общий азот N, мг/100 г	Общий фосфор P_2O_5, мг/100 г	Общий калий K_2O, мг/100 г	Нитраты, мг/100 г	Влажность, %	pH
Субстрат на воде	2×10^6	6031	384	71,3	1,8	86	6,8
Субстрат на воде + uTerra	3×10^6	3154	845	139,2	2,4	78,1	7
Микрозелень на воде	1×10^6	2402	1176	495,1	13,3	91,4	6,8
Микрозелень на воде + uTerra	3×10^6	2003	1474	587,8	9,7	91,4	7

Содержание нитратов достоверно уменьшалось в образцах, для которых применялась комплексная подкормка для растений uTerra. Это свидетельствует о более полном усвоении азота в форме нитратов в субстрате, а в самой микрозелени – о полноценном включении элемента в биохимические синтезы белков, нуклеиновых кислот для построения клеток и тканей, о запасании минералов для последующего роста, активации минерализации [7].

Для микрозелени, выращенной по двум вариантам технологии, проводились также измерения содержания общего количества сахаров. Исходя из полученных результатов, можно говорить о значительном повышении данного показателя (на 33,1 %) при поливе растений с использованием эликсира плодородия uTerra (рисунок 4).

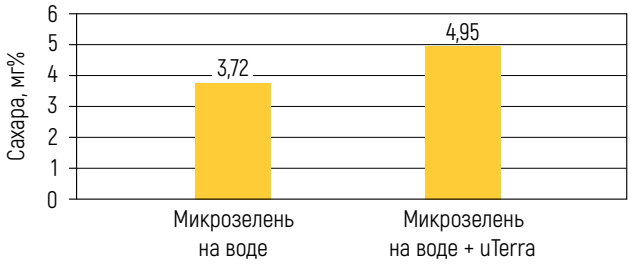


Рисунок 4 – Общее количество сахаров в образцах микрозелени (представлены средние значения со стандартными отклонениями)

Заключение

Важнейшей задачей земной техногенной цивилизации является улучшение качества жизни и здоровья мирового населения, а также сохранение ресурсов планеты. В замкнутой экосистеме биосферного типа, например в ЭкоКосмоДоме (ЭКД), требуется поиск средств для поддержания автономности, что подразумевает крупномасштабную работу широкого круга специалистов и организацию должных мероприятий. Соответственно, жителей ЭКД нужно обеспечить в том числе органической растительной продукцией, которую невозможно получить без биоудобрений, содержащих весь спектр агрономически ценных почвенных микроорганизмов.

В ходе выполнения настоящего исследования изучены два варианта съедобных органических субстратов для дальнейшего выращивания микрозелени амаранта овощного. Проведены их физиологические, биохимические и химические анализы. Определено, что использование льнотресты даёт более стабильные и качественные результаты по сравнению с соломой. Все растения амаранта овощного достигли нужной высоты на восьмой день и были пригодны для кормления животных.

Представленные в статье экспериментальные данные позволяют понять необходимость и эффективность применения эликсира плодородия uTerra для выращивания сельскохозяйственной продукции в замкнутой экосистеме.

В результате проведённых исследований установлено, что использование подкормки позволило увеличить содержание общего количества сахаров по сравнению с контролем в готовой микрозелени (на 33,1 %) и агрономически ценных микроорганизмов (примерно в три раза). Кроме того, отмечен рост количества таких важных элементов, как фосфор и калий. Содержание нитратов достоверно уменьшалось в образцах, где использовался эликсир плодородия uTerra. Соотношение массы семян и полученной зелёной биомассы составило 1 : 170 в случае с микрозеленью, выращенной на соломе, и 1 : 200 при культивировании на льнотресте.

Для традиционных кормов (кукуруза или пшеница) соотношение массы семян и полученной зелёной биомассы обычно составляет около 1 : 30 или 1 : 50, что указывает на меньшую эффективность в преобразовании семян в кормовую массу. Вместе с тем в отличие от обычного зерна микрозелень содержит более широкий спектр микронутриентов (витамины, минералы, антиоксиданты). Следовательно, микрозелень, произведённая с использованием соломы

и льнотресты, демонстрирует значительно более высокую продуктивность и питательную ценность по сравнению с обычными кормами, что делает её перспективным вариантом для питания животных.

Дальнейшие исследования в данной области будут сосредоточены на изучении влияния микрозелени амаранта овощного, выращенной с применением жидкой подкормки uTerra, на здоровье и продуктивность животных. Это позволит не только улучшить качество кормов, но и повысить общую эффективность сельского хозяйства, обеспечивая устойчивое и экологически безопасное производство.

Список основных источников

1. *Nutritional Quality and Health Benefits of Microgreens, a Crop of Modern Agriculture / Y. Zhang, Z. Xiaob, E. Ager [et al.] // Journal of Future Foods. – 2021. – Vol. 1, iss. 1. – P. 58–66.*
2. *Юницкий, А.Э. Программа «ЭкоМир» / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 24–77.*
3. *Exploration of Wheatgrass as Functional Food by Using Urban Agriculture Models for Regulating Growth & Nutrients / N.L. Patil, A.A. Kulkarni, D. Amalnerkar, S.C. Kamble // South African Journal of Botany. – 2022. – Vol. 151, pt. B. – P. 284–289.*
4. *Шишкин, П.В. Бессубстратная технология гидропонного выращивания / П.В. Шишкин, О.В. Антипова // Овощи России. – 2017. – № 3 (36). – С. 56–61.*
5. *Налетов, И.В. Исследование и отбор исходного материала амаранта овощного (Amaranthus hypochondriacus L.) на пищевую ценность / И.В. Налетов, В.С. Заяц // Селекция и генетика: инновации и перспективы: материалы III междунар. науч.-практ. конф., Горки, 25 сент. 2023 г. / Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2023. – С. 60–62.*
6. *Оценка инфицированности семян бактериальными и грибными патогенными микроорганизмами. Тенденции применения микробиологии в борьбе с ними / В.В. Котляров, Н.И. Сединина, В.А. Поплевина, Д.В. Котляров // Перспективы использования инновационных форм удобрений, средств защиты и регуляторов роста растений в агротехнологиях сельскохозяйственных культур: материалы докл. участников 9-й науч.-практ. конф. «Анапа-2016», Анапа, 19–23 сент. 2016 г. / ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова. – М., 2016. – С. 89–92.*
7. *Мазаева, Ю.В. Эффективность удобрений при выращивании микрогрина / Ю.В. Мазаева, А.Ю. Трунов, А.М. Лаптиева // Наука и Образование. – 2025. – Т. 8, № 1. – URL: https://opusmgau.ru/index.php/see/article/view/7412 (дата обращения: 20.05.2025).*

УДК 582.663:633.2+629.7

Отбор сортов амаранта овощного в коллекционный питомник для культивирования в замкнутой экосистеме

А.Э. Юницкий[1, 2]
доктор философии транспорта

В.С. Заяц[2]

И.В. Налетов[2]

[1] ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

[2] ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

Цель работы – изучить морфологические, биохимические и физиологические особенности линий/сортообразцов амаранта овощного (*Amaranthus hypochondriacus* L.), определяющие их ценность для выращивания в условиях замкнутых экосистем.

Исследования продолжались в течение двух лет (2023–2024 гг.) на опытных полях Крестьянского (фермерского) хозяйства «Юницкого» (г. Марьина Горка, Беларусь). Для получения наиболее продуктивных сортов амаранта овощного проведена закладка коллекционного питомника. В качестве исходного материала использовались пять различных линий/сортообразцов растения, для которых была выполнена четырёхзначная кодировка.

В статье представлены результаты изучения морфологических, биохимических и физиологических параметров культуры. При морфологическом анализе измерялись высота растения и диаметр основного стебля, осуществлялась фотофиксация с дальнейшей визуальной оценкой листа и соцветия. Определялись урожайность линий/сортообразцов, общее число сахаров и количество хлорофилла *a* и *b* в листьях, содержание белка в семенах. При этом учитывались погодные условия и зависимость признаков от внешних абиотических факторов (средняя температура, осадки, фотосинтетически активная радиация).

Ключевые слова:
амарант овощной (Amaranthus hypochondriacus L.), замкнутые экосистемы, коллекционный питомник, селекция амаранта.

UDC 582.663:633.2+629.7

Selection of Vegetable Amaranth Varieties for Collection Nursery for Cultivation in Closed Ecosystem

A. Unitsky [1, 2]
Dr. of Philosophy
in Information Technologies
(Transport)

V. Zayats [2]

I. Naletov [2]

[1] Astroengineering Technologies LLC,
Minsk, Belarus

[2] Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

The aim of this study is to investigate the morphological, biochemical, and physiological characteristics of lines/varieties of vegetable amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.) that enhance their suitability for cultivation in closed ecosystems.

The research was conducted over a two-year period (2023–2024) at the experimental fields of the Unitsky Farm Enterprise (Maryina Gorka, Belarus). A collection nursery was established to develop the most productive varieties of vegetable amaranth. Five distinct lines/varieties of the plant were utilized as source material, each assigned a unique four-digit code.

This article presents the results of studying the morphological, biochemical, and physiological parameters of the crop. During the morphological assessment, measurements were taken of plant height and the diameter of the main stem, accompanied by photographs for visual evaluation of leaves and inflorescences. The yield of each line/variety, total sugars, levels of chlorophyll *a* and *b* in the leaves, and protein content in the seeds were also determined. The study considered the weather conditions and the relationship between traits and external abiotic factors, including average temperature, precipitation, and photosynthetically active radiation.

Keywords:
amaranth breeding,
closed ecosystems,
collection nursery,
vegetable amaranth
(Amaranthus hypochondriacus L.).

Введение

Из тысяч съедобных растений только три злака – кукуруза, пшеница и рис – являются главными источниками пищи для большинства людей во всём мире. Хотя эти зерновые содержат значительное количество калорий, в их составе не так много белка и других важных питательных веществ. Использование только некоторых культур, часто имеющих узкую генетическую основу, приводит к тому, что современные системы земледелия становятся уязвимыми к изменению климата и сопутствующим экстремальным погодным условиям. Кроме того, снижается разнообразие пищи и ограничивается поступление макро-, микро- и ультрамикроэлементов в виде биоорганических соединений, необходимых для строения и функционирования клеток, тканей и органов всех живых существ, в том числе человека [1]. Расширение пищевой базы за счёт интеграции новых культур может помочь смягчить последствия изменений окружающей среды и повысить продовольственную безопасность [2].

Известны тысячи традиционных растений, но в прошлом веке им уделялось недостаточно внимания, а усилия по селекции были ограничены. Амарант является малоиспользуемой псевдозерновой культурой, но представляет особый интерес благодаря сбалансированному составу аминокислот и микроэлементов [3]. Вместе с тем способность противостоять стрессовым факторам, а также фотосинтетический путь C4, присущий данному растению, делают его подходящим выбором для будущих сельскохозяйственных систем. Несмотря на это, исследования в области получения новых сортов амаранта сильно отстают по сравнению с работой над основными популярными аграрными культурами [4]. Растение обладает широкой адаптивностью и может возделываться как в умеренных, так и в тропических климатических зонах [5]. В последние десятилетия наблюдается повышенный интерес к амаранту, связанный с его потенциалом для использования в качестве источника питательных веществ, а также в различных фармацевтических целях. Кроме того, растение способно адаптироваться к таким экологическим стрессам, как высокая температура, засуха, а его культивирование не требует значительных затрат [6].

Зёрна и листья амаранта являются источником полноценного белка и липидов с более высоким содержнием минералов – кальция, калия и фосфора, чем в зерновых культурах. Многие зерновые имеют недостаток незаменимой аминокислоты лизина и избыток лейцина, изолейцина и валина, в то время как амарант богат лизином (5,2–6,1 г/100 г белка) и поэтому отличается хорошо сбалансированным составом аминокислот. Аналогично количество серосодержащих аминокислот в амаранте сравнительно выше (2,6–5,5 г/100 г белка), чем в большинстве видов бобовых (1,4 г/100 г белка) [7, 8]. Сумма незаменимых аминокислот варьируется от 31,22 до 44,88 г/100 г общего белка [9, 10], что делает растение хорошим источником высококачественного протеина и заменителем некоторых зерновых культур в функциональных продуктах питания, а также обычных добавок в кормовых смесях для животных.

В среднем зерно амаранта содержит 13,1–21 % сырого протеина [11], который в основном состоит из легкоусвояемых альбуминов и глобулинов (50–60 % общего белка), включает 20,8 % щелочерастворимых белков глютелинов, по своей питательной ценности близких к альбуминам и глобулинам, и только 12 % щелочерастворимых белков проламинов, бедных незаменимыми аминокислотами [12]. Содержание белка варьируется в зависимости от вида и сорта амаранта, причём дикие (сорные) виды имеют больше белков, аминокислот и других питательных веществ, чем культурные [13].

Одно растение амаранта даёт до полумиллиона зёрен – почти столько же, сколько пшеница и рис с 1 га посевов. В связи с этим амарант представляет особый интерес для выращивания микрозелени: урожаем одного растения можно, например, кормить корову витаминной продукцией целый год, выращивая из него микрозелень, что особенно важно в ограниченном пространстве замкнутой экосистемы.

В рамках развития технологической цивилизации рассматриваются варианты возделывания культур в условиях искусственной биосферы. Здесь высшие растения не только обеспечивают человека пищей, осуществляют рециркуляцию основных газов и регенерируют воду, но и способствуют удалению из атмосферы токсичных примесей, выделяемых компонентами экологической системы. Кроме того, эффективное производство продуктов питания с учётом защиты окружающей среды необходимо при круговороте материалов. Следовательно, требуется подбор наилучших высокопродуктивных сортов, подходящих для выращивания в контролируемых условиях и обладающих высокой питательной ценностью.

В области селекции амаранта работы ведутся над повышением содержания биологически активных веществ (витамины C и E, амарантин, рутин, каротиноиды, фитостиролы и др.), а также белка и незаменимых аминокислот, в большей степени лизина [14–16]. Кроме того, актуальны исследования, направленные на распространение практики кормового применения растения [17].

Таким образом, получение новых сортов амаранта овощного (*Amaranthus hypochondriacus* L.) – насущная задача для его дальнейшего использования как в современном сельском хозяйстве, так и в закрытых экосистемах. Для этого в первую очередь необходимо изучить морфологические, биохимические и физиологические параметры различных сортов растения и определить их эффективность в замкнутых экосистемах биосферного типа, что и является целью настоящей работы.

Материалы и методы исследования

Коллекционный питомник амаранта овощного заложен на территории Крестьянского (фермерского) хозяйства «Юницкого» (КФХ «Юницкого», г. Марьина Горка, Беларусь). Почва на данной территории представлена дерново-подзолистым средним суглинком. В период вегетации культуры в 2023–2024 гг. наблюдались различные погодные условия (таблица 1), которые создавали абиотические стрессы для растений, что позволило всесторонне оценить исходный материал и отобрать формы с высокими адаптационными свойствами.

Таблица 1 – Климатические условия на территории КФХ «Юницкого» в 2023–2024 гг.

Год	Месяц											
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Осадки, мм												
2023	5	19	21	50	72	25	91	70	63	6	63	39
2024	8	15	26	67	77	48	50	79	45	6	46	32
Температура воздуха, °C												
2023	–3,8	–1,7	2,7	7,8	13,3	18,6	19,3	18,9	13,1	7,4	2,2	–1,1
2024	–7,8	–4,2	3,8	9,1	15,4	20,5	19,1	16,9	12,8	8,2	3,1	–2,1
Фотосинтетически активная радиация, мкмоль · $с^{-1}$												
Среднее значение	0,8	1,5	3,6	4,6	6,9	7,4	7	5,4	3,5	1,9	0,8	0,5

Исходный материал для исследования представлен образцами амаранта вида *Amaranthus hypochondriacus* L. пяти различных сортов. Этот вид выбран по причине большого разнообразия сортов и широкого применения для получения семян и производства силоса. Условно сорта закодированы: 0401, 0402, 0403, 0404, 0405. В таблице 2 приведены их основные характеристики согласно данным производителя.

Таблица 2 – Основные характеристики исследуемых сортов амаранта овощного

Код	Описание
0401	Смесь различных сортов амаранта овощного; активно применяется для выращивания микрозелени. В данных сортах содержатся белки, аминокислоты, витамины B, E, C, D, полиненасыщенные жирные кислоты, минеральные компоненты
0402	Источник легкоусвояемого белка. Раннеспелый сорт. Период от полных всходов до начала технической спелости составляет 70–80 дней. Высота растения 120–140 см. Лист красный, нежный, сочный. Соцветие прямостоячее, окраска от красной до тёмно-коричневой. Не требует плодородной почвы, засухо- и болезнеустойчиво
0403	Однолетнее раннеспелое (28–35 дней) травянистое растение. Высота 60–140 см. Листья эллиптические, зелёного цвета, нежные, маслянистые. Соцветие прямостоячее. Является источником растительного легкоусвояемого белка
0404	Сорт ценится за содержание незаменимых аминокислот, пектинов, биологически активных веществ. Используется как источник сырья для получения натурального пищевого красно-фиолетового красителя. Растения высотой 100–170 см. Урожайность 0,5–4,2 кг/$м^2$
0405	Смесь сортов с высоким содержанием белка, выращиваемых с целью сбора семян. Высота до 170 см. Урожайность 3 кг/$м^2$

Семена амаранта высевали вручную на двухрядковых делянках площадью 9 $м^2$ при температуре почвы выше 10 °C. Повторность – двукратная. Густоту стояния растений формировали в период 2–6 настоящих листьев. Использовалась общепринятая в Республике Беларусь агротехника, рекомендованная Научно-практическим центром НАН Беларуси по земледелию для выращивания амаранта овощного в полевых условиях [18]. Уход за посевами включал междурядные культивации и окучивание. Уборка производилась вручную. Урожайность семян, высоту растений, диаметр главных побегов определяли согласно Методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур [19]. Общее число сахаров [20], количество хлорофилла *a* и *b* в листьях [21] и белка в семенах [22] измеряли с помощью спектрофотометра ПЭ-5300ВИ («Экохим», Россия).

Результаты исследования

Изучение исходного материала для селекции амаранта позволило дать оценку сортообразцам коллекции, различающимся по морфологическим и хозяйственно-ценным признакам.

Продолжительность межфазного периода «всходы – вымётывание» сортообразцов во время исследования варьировалась от 23 до 63 дней; «всходы – начало цветения» – от 6 до 27 дней; «всходы – полная спелость» – от 45 до 136 дней.

Высота растений сортообразцов фиксировалась от 99 до 252 см. Урожайность составляла от 0,4 до 2,3 кг/м^2. Сводные данные по различным морфологическим признакам и урожайности за 2023 г. представлены в таблице 3, за 2024 г. – в таблице 4.

Исходя из данных таблицы 3, в качестве самого высокорослого сорта стоит выделить 0405: (237 ± 15) см, низкорослого – 0404: (102 ± 3) см. По показателям урожайности лидируют растения амаранта 0403: 2 кг/м^2.

По результатам исследования в 2024 г. (таблица 4) выявлены следующие различия у линий/сортообразцов: к высокорослым вариантам можно отнести 0401 и 0402 со значениями (177 ± 16) см и (168 ± 10) см соответственно; к низкорослым – 0404 и 0405 с высотой (111 ± 7) см и (125 ± 11) см соответственно. Диаметр основного стебля наибольший у линий 0401, 0402, 0403 и 0405, вариант 0404 имел статистически значимое меньшее значение: (4,1 ± 0,9) см. По урожайности максимальные показатели у линии 0403: 2,3 кг/м^2.

Для оценки питательной ценности линий/сортообразцов исследовалось количество белка в семенах, общее число сахаров и количество хлорофилла в листьях. На рисунках 1–3 приведены графики сравнения данных показателей по годам вегетации.

Самое высокое содержание белка характерно для варианта 0403 как в 2023 г., так и в 2024 г.: 10,2 и 10 г/100 г семян соответственно. После дополнительной сушки зерна данный показатель увеличивается на 30–50 %.

Наибольшее содержание сахаров в 2023 г. наблюдалось в вариантах 0401 и 0405: 1,9 и 1,8 мг% соответственно, а в 2024 г. – в 0403 и 0405: 1,62 и 1,55 мг% соответственно. Число сахаров является важным показателем пригодности растительного сырья для силосования и использования в качестве кормовой добавки животным.

Максимальное количество хлорофилла *a* и *b* в листьях отмечено для линий 0403 и 0405 как в 2023 г., так и в 2024 г. Концентрация хлорофилла в листьях связана с фотосинтетическим потенциалом растения, а значит, с его способностью к активной вегетации и максимальной оптимизации энергии для ассимиляции углеводов. Листовые пластины данных линий окрашены в зелёный цвет, что обусловлено более высоким уровнем зелёного пигмента, в то время как у остальных сортообразцов присутствует антоциановая окраска различной интенсивности.

Таблица 3 – Описание морфологических признаков и урожайности амаранта овощного за 2023 г.*

Код	Лист	Соцветие	Высота растения, см	Урожайность, кг/м^2	Диаметр основного стебля, см
0401			187 ± 8	1,5	5 ± 0,3
0402			165 ± 21	1	5 ± 0,2
0403			167 ± 14	2	4,9 ± 0,5
0404			102 ± 3	0,5	4,7 ± 0,3
0405			237 ± 15	0,9	4,8 ± 0,7

* Данные представлены в виде средних значений со стандартным отклонением (M ± SD).

Таблица 4 – Описание морфологических признаков и урожайности амаранта овощного за 2024 г.*

Код	Лист	Соцветие	Высота растения, см	Урожайность, кг/м²	Диаметр основного стебля, см
0401			177 ± 16	1	5,1 ± 0,3
0402			168 ± 10	1,2	5,2 ± 0,5
0403			147 ± 8	2,3	5 ± 0,4
0404			111 ± 7	0,4	4,1 ± 0,9
0405			125 ± 11	0,8	5 ± 0,5

* Данные представлены в виде средних значений со стандартным отклонением (M ± SD).

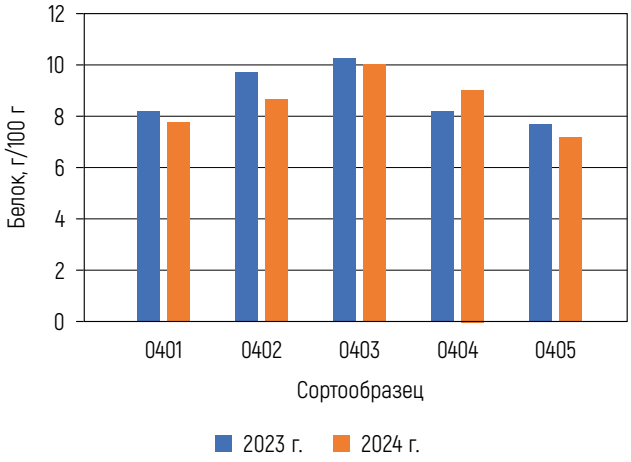


Рисунок 1 – Количество белка в семенах амаранта овощного

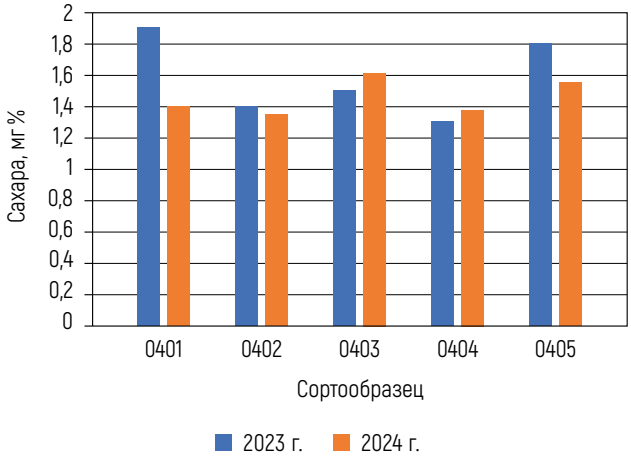


Рисунок 2 – Общее число сахаров в листьях амаранта овощного

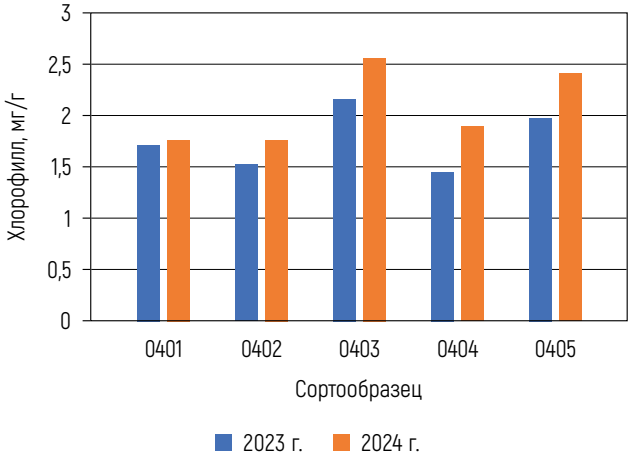


Рисунок 3 – Количество хлорофилла в листьях амаранта овощного

Заключение

Выявленная вариация морфологических признаков и биологических свойств у сортообразцов амаранта овощного позволила вести целенаправленную работу по созданию новых перспективных для территории Республики Беларусь сортов. В рамках текущих исследований основными направлениями селекции данного растения для культивирования в условиях замкнутых экосистем определены:

- высокая урожайность;
- высокое содержание белка в семенах (для применения в пищевых целях);
- высокое число сахаров в листьях (для использования в качестве кормовой базы для сельскохозяйственных животных);
- большое количество семян с одного растения – около 200 000 (важно для дальнейшего ежегодного выращивания);
- низкорослость (для экономии пространства).

По числу сахаров лидируют сортообразцы 0401 и 0405, по урожайности и содержанию белка – 0403. Наименьший рост продемонстрировал вариант 0404.

При скрещивании и получении гибридов данных коллекционных образцов есть высокая вероятность выведения оптимальных сортов для эффективного культивирования в замкнутых экосистемах. Дальнейшие исследования будут нацелены на изучение свойств амаранта овощного при выращивании в условиях космоса и воздействии дополнительных абиотических угнетающих факторов.

В рамках замкнутой экосистемы предусмотрено возделывание культуры не только в качестве питательной базы для животных (зелёный корм с подложкой), но и как источника зерна и микрозелени для человека, а также в декоративных целях. Амарант овощной отличается большим количеством семян с одного растения (примерно в 10 000 раз больше, чем с одного растения пшеницы), что позволит при необходимости сделать тщательный отбор семян для высева и создать большой запас посевного материала. Таким образом, получение собственных высокопродуктивных устойчивых сортов требуется для полноценного существования цикличных процессов в замкнутой экосистеме ограниченных размеров.

Список основных источников

1. *Caselato-Sousa, V.M. State of Knowledge on Amaranth Grain: A Comprehensive Review / V.M. Caselato-Sousa, J. Amaya-Farfán // Journal of Food Science. – 2012. – Vol. 77, iss. 4. – P. R93–R104.*
2. *Venskutonis, P.R. Nutritional Components of Amaranth Seeds and Vegetables: A Review on Composition, Properties, and Uses / P.R. Venskutonis, P. Kraujalis // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2013. – Vol. 12, iss. 4. – P. 381–412.*
3. *Заяц, В.С. Протекторная способность экзогенных элиситоров из Ganoderma lucidum при индукции солевого стресса у кресс-салата / В.С. Заяц, И.В. Налетов, Е.А. Крюков // Настоящее и будущее биотехнологии растений: материалы междунар. науч. конф., посвящ. 65-летию деятельности отд. биохимии и биотехнологии растений ГНУ «Централ. ботан. сад НАН Беларуси», Минск, 24–26 мая 2023 г. / НАН Беларуси, Отд-ние биолог. наук [и др.]; редкол.: В.Н. Решетников [и др.]. – Минск, 2023. – С. 75.*
4. *Ассоциация агрономически ценных микроорганизмов для улучшения плодородия земель / В.С. Заяц, Н.С. Зыль, И.В. Налетов, Т.И. Пятакова // Микробные биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты: материалы XIII междунар. науч. конф., Минск, 6–9 июня 2023 г. / НАН Беларуси, Отд-ние биолог. наук [и др.]; орг. ком.: А.А. Шепелев (пред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 266–267.*
5. *Юницкий, А.Э. Амарант овощной Amaranthus hypochondriacus L. как универсальная культура для производства пищи и восстановления плодородия почвы / А.Э. Юницкий, Н.С. Зыль, И.В. Налётов // Сахаровские чтения 2024 года: экологические проблемы XXI века: материалы 24-й междунар. науч. конф., Минск, 23–24 мая 2024 г.: в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, УО «Междунар. гос. эколог. ин-т им. А.Д. Сахарова» Белорус. гос. ун-та; редкол: А.Н. Батян [и др.]; под общ. ред. О.И. Родькина, М.Г. Герменчук. – Минск, 2024. – Ч. 2. – С. 75–79.*
6. *An Overview of the Nutritional and Therapeutic Properties of Amaranth / M. Sattar, F. Saeed, M. Afzaal [et al.] // International Journal of Food Properties. – 2024. – Vol. 27, iss. 1. – P. 263–272.*
7. *Baraniak, J. The Dual Nature of Amaranth – Functional Food and Potential Medicine / J. Baraniak, M. Kania-Dobrowolska // Foods. – 2022. – Vol. 11, iss. 4. – 618.*
8. *Rastogi, A. Amaranth: A New Millennium Crop of Nutraceutical Values / A. Rastogi, S. Shukla // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2013. – Vol. 53, iss. 2. – P. 109–125.*

9. *Maurya, N.K. Amaranthus Grain Nutritional Benefits: A Review / N.K. Maurya, P. Arya // Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. – 2018. – Vol. 7, iss. 2. – P. 2258–2262.*
10. *Высочина, Г.И. Амарант (Amaranthus L.): химический состав и перспективы использования (обзор) / Г.И. Высочина // Химия растительного сырья. – 2013. – N° 2. – С. 5–14.*
11. *Амарант: химический состав, биохимические свойства и способы переработки / И.А. Абрамов, Н.Е. Елисеева, В.В. Колпакова, Т.И. Пискун // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2011. – N° 6. – С. 44–48.*
12. *Жаркова, И.М. Амарант: научно-практические аспекты применения в пищевой промышленности / И.М. Жаркова. – Воронеж: Воронеж. гос. ун-т инженер. технологий, 2016. – 198 с.*
13. *Таипова, Р.М. Амарант: особенности культуры, применение, перспективы возделывания в России и создания трансгенных отечественных сортов / Р.М. Таипова, Б.Р. Кулуев // Биомика. – 2015. – Т. 7, N° 4. – С. 284–299.*
14. *Шор, М.Ф. Изучение исходного материала для селекции могара, чумизы, пайзы и амаранта в условиях Нижнего Поволжья: дис. … канд. с.-х. наук: 06.01.05 / Шор Марина Фёдоровна; Рос. науч.-исслед. и проект.-технолог. ин-т сорго и кукурузы. – Саратов, 2008. – 222 л.*
15. *Щербань, А.Б. Физиолого-биохимические и генетические основы селекции амаранта (Amaranthus L.) для пищевых и кормовых целей (обзор) / А.Б. Щербань // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. – 2020. – Т. 181, N° 4. – С. 213–221.*
16. *Gimplinger, D.M. Calibration and Validation of the Crop Growth Model LINTUL for Grain Amaranth (Amaranthus sp.) / D.M. Gimplinger, H.P. Kaul // Journal of Applied Botany and Food Quality. – 2009. – Vol. 82, No. 2. – P. 183–192.*
17. *Писковацкий, Ю.М. Селекция амаранта кормового типа / Ю.М. Писковацкий, М.Г. Ломова, Ю.М. Ненароков // Многофункциональное адаптивное кормопроизводство: сб. науч. тр. / ФГБНУ «ВНИИ кормов им. В.Р. Вильямса»; редкол.: В.М. Косолапов (гл. ред.) [и др.]. – М., 2015. – Вып. 7 (55). – С. 77–84.*
18. *Гриб, С.И. Приоритеты стратегии и направления селекции полевых культур в Беларуси / С.И. Гриб // Стратегия и приоритеты развития земледелия и селекции полевых культур в Беларуси: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию со дня основания РУП «Науч.-практ. центр НАН Беларуси по земледелию», Жодино, 5–6 июля 2017 г. / НАН Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по земледелию. – Минск, 2017. – С. 214–215.*
19. *Методика проведения испытания сортов на отличимость, однородность и стабильность / М-во сельского хоз-ва и прод. Респ. Беларусь, Гос. инспекция по испытанию и охране сортов растений; сост. В.А. Бейня [и др.]. – Минск, 2015. – 241 с.*
20. *Корма, комбикорма. Методы определения растворимых и легкогидролизуемых углеводов: ГОСТ 26176-2019. – Взамен ГОСТ 26176-91; введ. 01.08.2020. – М.: Стандартинформ, 2019. – IV, 12 с.*
21. *Физиология растений: практикум / сост.: О.В. Молчан [и др.]. – Минск: БГУ, 2015. – 135 с.*
22. *Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка: ГОСТ 10846-91. – Взамен ГОСТ 10846-74; введ. 01.06.1993. – М.: Стандартинформ, 2009. – 8 с.*

УДК 631.871+629.7

Эликсир плодородия uTerra: комплексное влияние на качество и продуктивность сельскохозяйственных культур

А.Э. Юницкий[1, 2, 3]
доктор философии транспорта

Н.С. Зыль[2]

И.А. Деменская[3]

М.М. Парфенчик[2]

И.В. Налетов[2]

[1] ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

[2] ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

[3] КФХ «Юницкого», г. Марьина Горка, Беларусь

В рамках программы «ЭкоМир» разработана технология получения уникального биоудобрения – эликсира плодородия uTerra, который уже показал высокую результативность в сельском хозяйстве. Цель настоящего исследования – более детальное изучение воздействия эликсира плодородия uTerra на ключевые параметры качества растительной продукции, произведённой в открытом и закрытом грунте. Эксперименты проводились на территории Крестьянского (фермерского) хозяйства «Юницкого» и в Белорусской государственной сельскохозяйственной академии (2022–2024 гг.).

Полученные результаты могут послужить основой для создания экологичного комплекса органического питания для растений; использоваться для повышения эффективности агропромышленного сектора, что позволит в будущем решить многие экологические и производственные вопросы; способствовать развитию программы «ЭкоМир», включая применение разработанных технологий на земной орбите в ЭкоКосмоДомах с замкнутыми экосистемами биосферного типа.

Ключевые слова:
биоудобрения, восстановление почв, органическое земледелие, программа «ЭкоМир», чернозём, ЭкоКосмоДом (ЭКД), эликсир плодородия uTerra.

UDC 631.871+629.7

uTerra Fertility Elixir: Comprehensive Impact on Quality of Crop Production and Agricultural Productivity

A. Unitsky[1, 2, 3]
Dr. of Philosophy
in Information Technologies
(Transport)

N. Zyl[2]

I. Demenskaya[3]

M. Parfenchik[2]

I. Naletov[2]

[1] Astroengineering Technologies LLC, Minsk, Belarus

[2] Unitsky String Technologies Inc., Minsk, Belarus

[3] Unitsky Farm Enterprise, Maryina Gorka, Belarus

As part of the EcoSpace program, a technology has been developed for producing a unique biofertilizer – the uTerra fertility elixir, which has already demonstrated high efficiency in agriculture. The aim of this study is to examine in greater detail the effects of the uTerra fertility elixir on key quality parameters of crops grown in both open-field and greenhouse conditions. Experimental trials were conducted at the Unitsky Farm Enterprise and the Belarusian State Agricultural Academy between 2022 and 2024.

The results obtained can serve as a basis for the creation of an environmentally friendly complex for organic plant nutrition; be used to improve the efficiency of the agro-industrial sector, which will enable many environmental and production issues to be resolved in the future; contribute to the development of the EcoSpace program, including the application of the developed technologies in Earth orbit in EcoCosmoHouses with closed biosphere-type ecosystems.

Keywords:
biofertilizers, chernozem, EcoCosmoHouse (ECH), EcoSpace program, organic farming, soil restoration, uTerra fertility elixir.

Введение

Развитие сельского хозяйства на протяжении веков тесно связано с применением средств для повышения плодородия почвы – удобрений (например, таких органических подкормок, как сапропель, навоз, компост). Кроме того, ещё в древности земледельцы заметили, что на пепелищах через некоторое время урожайность культур возрастала. На этом знании было основано подсечно-огневое хозяйство [1].

По мере роста численности населения увеличивался спрос на продовольствие. В XIX в. изобрели синтетические удобрения, которые представляли собой более концентрированный источник питательных веществ, чем органические.

Первые минеральные удобрения – суперфосфаты, полученные из фосфатов апатита и фосфорита; позже появились азотные и калийные удобрения. Важным этапом считается открытие немецкого химика Ю. Либиха, который сформулировал «закон минимума», объясняющий, что урожайность ограничивается элементом, находящимся в недостаточном количестве [2]. Это стало основой для создания подкормок, сбалансированных по ключевым нутриентам.

Несмотря на то что синтетические удобрения начали широко использоваться, особенности их долговременного влияния на гумус, микробиом почвы, вынос микро- и ультрамикроэлементов, а также на снижение количества важных нутриентов в производимой растительной продукции долгое время мало учитывались при ведении сельского хозяйства.

В то же время гумус, т. е. органическое вещество, накапливающееся в почве, жизненно необходим для её здоровья. Он удерживает влагу и питательные элементы, улучшает структуру почвы и способствует росту культур за счёт высокого содержания биогенных соединений, является средой обитания микроорганизмов – бактерий, грибов, простейших, которые обеспечивают круговорот нутриентов, разложение органики и сохранение здоровья растений.

Тысячи видов агрономически ценных аэробных и анаэробных микроорганизмов увеличивают доступность питательных веществ, переводят их в подходящую для транспортировки форму за счёт органических кислот, ферментов и других метаболитов [3]. Помимо этого, почвенные микроорганизмы усиливают рост культур с помощью различных механизмов: фиксации атмосферного азота, синтеза фитогормонов (ауксины, гиббереллины, кинетины), а также препятствуют старению органов растений и преждевременному опаданию листьев, цветков, плодов. Ассоциации микроорганизмов осуществляют своеобразное предупреждение болезней растений, вызываемых другими бактериями и грибами.

Частое внесение минеральных удобрений и неконтролируемое использование агрохимикатов способствуют ускоренному (по сравнению с естественным) разложению природного гумуса, т. е. влечёт его уничтожение. На начальном этапе наблюдается значительный рост урожайности, но со временем содержание гумуса уменьшается, микро- и ультрамикроэлементы выносятся, что приводит не к повышению урожайности и плодородия почв, а к существенному снижению. В почве, а также в сельскохозяйственных культурах при этом накапливаются ядохимикаты, нитраты и другие вредные для человека и живой природы вещества, сокращается видовое разнообразие микроорганизмов [4].

Неконтролируемое применение минеральных удобрений и агрохимикатов стало главной причиной ужасающих потерь плодородных земель во всём мире. Ежегодно человечество утрачивает 25 млрд тонн почв, а территория, покрытая асфальтом, уже превышает размер пяти Великобританий и продолжает расти.

Уменьшение площади плодородных земель имеет серьёзные последствия для продовольственной безопасности и здоровья человека. Почва является основой сельского хозяйства, и её истощение угрожает снабжению населения продуктами питания. Кроме того, загрязнённые земли могут привести к выращиванию культур, в долгосрочной перспективе негативно влияющих на здоровье людей по причине недостаточности необходимых элементов, высокого уровня токсинов, тяжёлых металлов [5].

На данный момент производители удобрений предлагают различные продукты для органического сельского хозяйства, которые позволяют улучшать плодородие почв более естественным путём. К ним относятся биоудобрения, содержащие агрономически ценные почвенные микроорганизмы, например азотфиксирующие бактерии; фосфатмобилизирующие микроорганизмы; бактерии, стимулирующие рост; целлюлозолитические бактерии; микроорганизмы для детоксикации почв [6]. Рынок таких подкормок в связи со спросом на качественную, здоровую пищу постоянно растёт. Новые препараты расширяют перечень обрабатываемых культур и способов применения.

Особенности эликсира плодородия uTerra

Проект по выпуску органических биоудобрений uTerra берёт своё начало в программе «ЭкоМир» А.Э. Юницкого и является неотъемлемой частью масштабной программы uSpace, которая выходит далеко за рамки освоения околоземного пространства и нацелена на решение самых острых глобальных проблем человечества.

Исследования А.Э. Юницкого в области космических технологий привели его к пониманию важности создания замкнутых экосистем, способных поддерживать жизнь в суровых условиях космоса. Эти принципы легли в основу разработки эликсира плодородия uTerra.

В процессе изготовления данного биоудобрения используются агрономически ценные почвенные аэробные и анаэробные микроорганизмы, насчитывающие миллионы видов и являющиеся иммунной системой природных почв и земной биосферы в целом. Эликсир плодородия uTerra содержит всё необходимое для полноценного питания почвенной фауны и ассоциаций микроорганизмов, а также для поддержания здоровья самих почв. Это напрямую отражается на состоянии произрастающих культур и, соответственно, на употребляющих их в пищу животных и человеке [7], ведь все без исключения растения находятся в симбиозе с микроорганизмами, живущими в их корнях, листьях, плодах и семенах [8].

Составляющие эликсира плодородия uTerra

Эликсир плодородия uTerra изготавливается путём биопроцессинга из рассыпчатого биогумуса uTerra (выступает инокулятом агрономически ценных почвенных микроорганизмов, обитающих в мировом Банке почв uTerra), а также из реликтового ископаемого сырья (бурый уголь, горючие сланцы, торф), морской соли, природных грибных элиситоров, продуктов пчеловодства, мелассы, минеральных и органических питательных веществ, составляющих комплекс биогенных элементов, необходимых для жизнедеятельности растений.

Мировой Банк почв uTerra

Тысячи видов агрономически ценных микроорганизмов, находящихся в продукции линейки uTerra, взяты из уникального, единственного в своём роде мирового Банка почв uTerra (рисунок). Данный объект на территории Крестьянского (фермерского) хозяйства «Юницкого» (КФХ «Юницкого», г. Марьина Горка, Беларусь) создан в 2019 г. его основателем в рамках программы «ЭкоМир» и состоит из плодородных почв, не тронутых плугом и химическими удобрениями. Образцы доставлены в Беларусь из более чем 200 регионов мира, т. е. бережно собраны со всех континентов нашей планеты, кроме Антарктиды. Банк почв имеет диаметр 20 м, общую массу около 200 000 кг и содержит максимально широкое природное разнообразие живых агрономически ценных микроорганизмов.

Рисунок – Мировой Банк почв uTerra

Биогумус uTerra для эликсира плодородия uTerra

Главным живым организмом, производящим биогумус для эликсира плодородия uTerra, является червь *Lumbricus uTerris*. Поскольку в природе обычный земляной червь не употребляет в качестве пищи бурый уголь, специалистами КФХ «Юницкого» в его организм были заселены биодеструкторы угля – уникальные ассоциации бактерий и простейших грибов, найденные на месторождениях бурого угля и доставленные в Республику Беларусь. Таким образом выведена особая линия червя – он более активный, быстрее размножается, живёт дольше, чем обычный дождевой червь, и может употреблять в пищу бурый уголь (торф и/или горючие сланцы), который более 100 млн лет назад был растением, взявшим все необходимые для своей жизни минералы из древней почвы.

В биогумусе uTerra поддерживается ассоциация микроорганизмов из мирового Банка почв uTerra, что позволяет обеспечивать высокую концентрацию агрономически ценных почвенных микроорганизмов в эликсире плодородия uTerra.

Бурый уголь, торф и сланцы – реликтовое сырьё для производства эликсира плодородия uTerra и биогумуса uTerra

В процессе производства эликсира плодородия uTerra используются торф, горючие сланцы, а также ископаемое реликтовое сырьё мезозойской эры (бурый уголь). Оно содержит полный спектр органических соединений и минеральных солей – около 80 химических элементов таблицы Менделеева, необходимых для роста и развития культур. Эти вещества были частью древних растений и реликтовых почв, существовавших до начала промышленной деятельности человека.

Морская соль для эликсира плодородия uTerra

Ещё одним источником микро- и ультрамикроэлементов в эликсире плодородия uTerra является морская соль. Её добывают естественным путём – выпариванием из морской воды под воздействием солнца и ветра, поэтому главные её преимущества – отсутствие примесей и природный разнообразный состав, поскольку исключено влияние посторонних физических и химических факторов. Такая соль содержит полезные минералы, способные компенсировать минеральный дефицит любого живого организма [9]. Кроме хлорида натрия она включает соли магния, кальция, калия, марганца и другие микро- и ультрамикроэлементы – более 80 химических элементов таблицы Менделеева, которые входят в состав любой живой клетки и без которых невозможен её здоровый метаболизм. Минеральные вещества морской соли принимают участие во всех обменных процессах, регуляции сердечной деятельности, работе почек и выполняют много других жизненно необходимых функций [10].

Грибные элиситоры для эликсира плодородия uTerra

Грибные элиситоры для эликсира плодородия uTerra, разработанные в ЗАО «Струнные технологии» (г. Минск, Беларусь), имеют исключительно биогенное происхождение и активизируют защитные функции растительных организмов. Данные вещества оказывают стимулирующее влияние на рост и развитие культур, повышают их выживаемость и приспосабливаемость путём формирования химических и физических барьеров, а также механизмов, позволяющих растению усиливать иммунитет и переносить неблагоприятные факторы внешней среды. Элиситоры уменьшают повреждающее воздействие засоления почв, солей тяжёлых металлов, перепадов температур; предупреждают развитие многих грибковых и бактериальных заболеваний за счёт пробуждения собственного генетического потенциала растений в виде преждевременной активации их первичного и вторичного иммунитета.

Продукты пчеловодства для эликсира плодородия uTerra

В производстве продукции uTerra применяется мёд из белорусского разнотравья и другие продукты пчеловодства (прополис, цветочная пыльца, воск, перга, забрус). Благодаря добавлению мёда в эликсире плодородия uTerra и биогумусе uTerra содержатся естественные фитогормоны, контролирующие все этапы жизненного цикла растений. Мёд является уникальным источником разнообразных органических веществ – сахаров, аминокислот, флавоноидов, биогенных стимуляторов, которые оказывают стимулирующее действие, участвуют в основных метаболических процессах в клетках растений, обеспечивают образование энергетически важных соединений для роста и развития. Мёд, собранный с цветов разнотравья, используется также в качестве питания для почвенной микрофлоры и микрофауны в процессе их продуцирования земляным червём *Lumbricus uTerris*.

Комплекс биогенных элементов для эликсира плодородия uTerra

В состав эликсира плодородия uTerra входят органические кислоты, меласса, минеральные компоненты. Они формируют комплекс биогенных элементов (макро-, микро-, ультрамикроэлементы), обеспечивают растения и агрономически ценные почвенные микроорганизмы питательными веществами, позволяют сохранять свойства подкормки длительное время, улучшают биодоступность соединений [11].

Влияние эликсира плодородия uTerra на характеристики растительной продукции

В 2022–2024 гг. КФХ «Юницкого» и Белорусская государственная сельскохозяйственная академия (БГСХА) провели серию научных экспериментов, направленных на оценку влияния эликсира плодородия uTerra на качественные и биохимические характеристики растительной продукции.

Исследования охватили широкий спектр сельскохозяйственных культур:

- салат листовой (*Lactuca sativa* L., сорт Грюнета) – в защищённом грунте;
- редис (*Raphanus sativus* L., сорт Смачный) – в защищённом грунте;
- огурец (*Cucumis sativus* L., гибрид Кураж F1) и томат (*Solanum lycopersicum* L., сорт Виноградная гроздь) – в условиях тепличного выращивания;
- яблоня домашняя (*Malus domestica*, сорт Белорусское сладкое) – в открытом грунте;
- пшеница яровая (*Triticum aestivum* L., сорт Любава) – в открытом поле.

Основная цель работы – изучение воздействия биоудобрения на ключевые параметры качества продукции:

- содержание аскорбиновой кислоты, каротина;
- концентрацию растворимых углеводов и сухого вещества;
- безопасность продукции (снижение уровня нитратов);
- количество белка, клейковины в зерне;
- урожайность продукции.

Исследования включали полевые мелкоделяночные и деляночные опыты с четырьмя повторностями. Обработка информации проводилась методами дисперсионного анализа с определением достоверности различий по критерию наименьшей существенной разницы ($НСР_{05}$).

В таблице обобщены результаты, полученные в ходе экспериментов, с акцентом на статистически значимые изменения основных показателей.

Проанализировав данные таблицы, можно сделать вывод, что эликсир плодородия uTerra положительно влияет на качество и урожайность сельскохозяйственных культур:

- повышает содержание витамина С;
- увеличивает количество растворимых углеводов;
- обеспечивает рост урожайности;
- регулирует уровень нитратов;
- улучшает другие показатели (каротин, клейковина, белок).

Таблица – Качественные показатели растительной продукции

Культура	Показатель	Контроль	uTerra	Примечания
Салат	Витамин С, мг/100 г	22,9	28,2	+23,14 %. $НСР_{05}$ = 4,28
	Нитраты, мг/кг	970	930	–4,12 %. ПДК* = 2000 мг/кг
	Растворимые углеводы, %	0,45	0,56	+24,44 %. $НСР_{05}$ = 0,12
	Урожайность, кг/м^2	3,27	3,98	+21,71 %. Прибавка 0,71 кг/м^2. $НСР_{05}$ = 0,424
Редис	Витамин С, мг/100 г	23,1	26,4	+14,29 %. $НСР_{05}$ = 2,53
	Нитраты, мг/кг	1080	1105	+2,31 %. ПДК = 1500 мг/кг
	Растворимые углеводы, %	1,32	1,52	+15,15 %. $НСР_{05}$ = 0,18
	Урожайность, кг/м^2	1,32	1,82	+37,88 %. Прибавка 0,5 кг/м^2. $НСР_{05}$ = 0,346
Огурец	Витамин С, мг/100 г	18,6	23,8	+27,96 %. $НСР_{05}$ = 2,91
	Нитраты, мг/кг	26,8	25,6	–4,48 %. ПДК = 300 мг/кг
	Растворимые углеводы, %	1,38	1,85	+34,06 %. $НСР_{05}$ = 0,41
	Урожайность, кг/м^2	10,7	13,8	+28,97 %. Прибавка 3,1 кг/м^2. $НСР_{05}$ = 1,88
Томат	Витамин С, мг/100 г	22,7	25,6	+12,78 %. $НСР_{05}$ = 2,84
	Нитраты, мг/кг	13,4	15,4	+14,93 %. ПДК = 300 мг/кг
	Растворимые углеводы, %	2,96	3,35	+13,18 %. $НСР_{05}$ = 1,58
	Каротин, мг/кг	29,7	33,2	+11,78 %. $НСР_{05}$ = 3,42
	Урожайность, кг/м^2	6,47	7,52	+16,23 %. Прибавка 1,05 кг/м^2. $НСР_{05}$ = 0,89
Яблоня	Витамин С, мг/100 г	12,34	15,18	+23,01 %. Прибавка 2,84 мг/100 г
	Растворимые углеводы, %	6,48	6,9	+6,48 %. Абсолютная прибавка 0,42 %
	Урожай, кг	55 626	61 500	+10,56 %. Прибавка 5874 кг
Пшеница	Клейковина, %	32,05	33,12	+3,34 %. Абсолютная прибавка 1,07 %
	Белок, %	14,93	15,74	+5,43 %. Абсолютная прибавка 0,81 %
	Общая стекловидность, %	49,17	50	+1,69 %. Абсолютная прибавка 0,83 %
	Урожайность, ц/га	38,3	42,7	+11,49 %. Повышение на 4,4 ц /га

* ПДК – предельно допустимая концентрация.

Положительный эффект объясняется комплексным действием компонентов uTerra. Микробные ассоциации (*Bacillus*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus* и др.) синтезируют фитогормоны, антибиотики, сидерофоры и ферменты, обеспечивают усвоение элементов питания из почвы. Гуминовые кислоты (из бурого угля, торфа и биогумуса) улучшают усвоение питательных элементов, повышают защиту от стрессов. Органические кислоты являются стимуляторами роста и развития культур, активизируют корнеобразование. Комплекс углеводов (из мелассы, продуктов пчеловодства) стимулирует развитие агрономически ценных почвенных микроорганизмов. Биогенные макро-, микро- и ультрамикроэлементы (из морской соли, мелассы, бурого угля, продуктов пчеловодства) участвуют в ферментативных процессах, снабжают растения и симбиотические микроорганизмы недостающими элементами питания.

Влияние микроорганизмов эликсира плодородия uTerra на показатели качества культур

Выполненные исследования позволяют сделать выводы о функциях некоторых видов агрономически ценных почвенных микроорганизмов, входящих в состав эликсира плодородия uTerra.

1. *Bacillus amyloliquefaciens*. Фиксация азота повышает содержание данного элемента в почве, что способствует урожайности культур, а также увеличению количества белка в пшенице [12].

Синтез ауксинов (ИУК) и гиббереллинов приводит к стимуляции роста корней и плодов [13].

Синтез антибиотиков (бациллин, итурин) вызывает подавление фитопатогенов (*Fusarium*, *Pythium*) [14].

Фосфатмобилизация улучшает усвоение фосфора растениями и обуславливает рост урожайности [15].

2. *Pseudomonas lini* и *Pseudonocardia aurantiaca*. Синтез сидерофоров помогает хелатировать железо, что в свою очередь предотвращает хлороз [16].

Продукция ACC-дезаминазы снижает стресс у растений, например при засухе, засолении [17].

Синтез защитных соединений приводит к подавлению грибковых инфекций [18].

3. *Rhodococcus rhodochrous* и *Rhodococcus* spp. Деградация токсинов (нитраты, пестициды) способствует снижению их количества в плодах, повышению безопасности продукции [19].

Биоконверсия гуминовых веществ улучшает доступность питательных элементов, что влечёт рост урожайности и содержания растворимых углеводов [20].

Синтезом каротиноидов, который происходит благодаря данным микроорганизмам, можно объяснить увеличение доли каротина в томатах [21].

Биохимические механизмы влияния эликсира плодородия uTerra на показатели качества культур

Повышение содержания витамина С

Гуминовые кислоты усиливают активность L-галактоно-1,4-лактондегидрогеназы – ключевого фермента синтеза аскорбиновой кислоты [22].

Микроэлементы (Mn, Cu, Zn) входят в состав антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутаза, каталаза), защищающих аскорбат от окисления [23]. Снижение скорости окисления повышает содержание и накопление аскорбиновой кислоты в плодах. Некоторые бактерии *Pseudomonas* синтезируют 2-кето-L-гулоновую кислоту (предшественник витамина С) [24].

Увеличение количества сахаров (растворимых углеводов)

Некоторые бактерии рода *Bacillus* продуцируют фитогормоны (гиббереллины), стимулирующие транспорт сахарозы в плоды [25].

Микроорганизмы-симбионты усиливают активность инвертазы и сахарозосинтазы в растениях [26].

Морская соль (Na, K, Mg, микроэлементы) улучшает работу аденозинтрифосфатаз, участвующих в транспорте углеводов [27].

Утилизация нитратов

Rhodococcus spp. метаболизируют нитраты до аммиака и аминокислот [28].

Грибные элиситоры активируют нитратредуктазу [29] в растениях, ускоряя конверсию NO_3^- в белки.

Повышение урожайности

Азотфиксация (*Pseudomonas*) и фосфатмобилизация (*Bacillus*) улучшают снабжение растений элементами питания благодаря увеличению количества растворимого фосфора и азота в прикорневой зоне [30].

Синтез фитогормонов микроорганизмами влияет на урожайность за счёт стимуляции ростовых процессов.

Так, ауксины воздействуют на рост корней, а гиббереллины – на цветение и плодообразование [31].

Микро- и ультрамикроэлементы, содержащиеся в природном сырье, участвуют в ростовых процессах [32].

Защита от стрессов происходит благодаря элиситорам из грибов. Кроме того, ACC-дезаминаза *Pseudomonas* снижает уровень этилена при засухе, регулируя таким образом этиленовый стресс [33].

На основании приведённых данных можно утверждать, что эликсир плодородия uTerra выступает как мультифункциональный биостимулятор и источник элементов питания растений, сочетая микробиологический эффект (фиксация азота, мобилизация фосфора и калия, синтез гормонов), биохимическое воздействие (активация ферментов, синтез витаминов и сахаров) и защитную роль (подавление патогенов, детоксикация нитратов). Рост возбудителей заболеваний может сдерживаться за счёт выделения противогрибковых соединений и конкурентного вытеснения видов, в том числе благодаря природным антибиотикам, содержащимся в биоудобрении uTerra.

Приведённые механизмы во многом объясняют повышение качества и урожайности сельхозкультур, подтверждённое исследованиями КФХ «Юницкого» и БГСХА в 2022–2024 гг.

Заключение

В статье рассмотрены основные проблемы современного сельского хозяйства, вопросы, связанные с загрязнением земель и выводом их из сельскохозяйственного оборота, причины снижения плодородия почвы и качества растительной продукции.

Даётся описание инновационного биоудобрения uTerra, разработанного для ведения органического земледелия, применения в биосферных поселениях, замкнутых экосистемах и призванного решить задачи обеспечения высококачественным продовольствием, а также повысить показатели финансовой эффективности производства сельскохозяйственных пищевых, кормовых и технических культур.

Авторами приводятся результаты исследования влияния эликсира плодородия uTerra на различные культуры (салат, редис, огурец, томат, яблоня, пшеница). Рассмотрены возможные механизмы воздействия составляющих биоудобрения на показатели роста и развития, содержание питательных веществ (витамин С, растворимые углеводы, каротин и др.).

В ходе экспериментов отмечены следующие положительные эффекты от применения подкормки:

- улучшение качества сельскохозяйственной продукции: количество витамина С выше до 27,96 %, растворимых углеводов в плодах – до 34,06 %, белка в зерне – на 5,43 % и клейковины – на 11,49 %;
- повышение урожайности до 37,88 % за счёт снабжения необходимыми питательными веществами и натуральными фитогормонами, а также комплексного воздействия на различные системы растительного организма;
- укрепление иммунитета растений, усиление защиты от болезней и вредителей благодаря натуральным антибиотикам;
- восстановление и поддержание почвенного плодородия, нарушенного естественными процессами или хозяйственной деятельностью человека;
- регуляция содержания нитратов в растительной продукции за счёт более эффективного использования азота культурами.

Эликсир плодородия uTerra может широко применяться не только в рамках программы «ЭкоМир» и её космической составляющей uSpace, но и в настоящее время для решения глобальных задач:

- снабжения качественным продовольствием: органические удобрения uTerra увеличивают урожайность сельскохозяйственных культур, позволяя обеспечить население планеты здоровыми и питательными продуктами;
- экологической безопасности: эликсир плодородия uTerra способствует восстановлению деградированных земель и повышению плодородия почв, что снижает давление на природные ресурсы и защищает экосистемы;
- инфраструктурной безопасности: повышение плодородия почв позволяет развивать сельское хозяйство в новых регионах, создавая рабочие места и улучшая качество жизни сельского населения;
- энергетической безопасности: биоудобрение uTerra содействует переходу к возобновляемым источникам энергии, поскольку благодаря его применению возможно восстановление пустынных земель и выращивание на них энергетических культур [34].

Таким образом, эликсир плодородия uTerra представляет собой инновационное решение, которое использует прогрессивные технологии и комплексный подход для преодоления глобальных проблем современности, обеспечивая устойчивое будущее для человечества.

В ходе дальнейших исследований планируется расширить перечень обрабатываемых культур, уточнить механизмы влияния компонентов удобрения на них, рассмотреть особенности применения эликсира плодородия uTerra в различных агроклиматических зонах.

Список основных источников

1. *Моделирование динамики углерода почвы при различных системах традиционного земледелия и лесопользования на территории Европейской России / М.В. Бобровский, А.С. Комаров, В.Н. Шанин [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – Т. 11, № 1 (7). – С. 1430–1434.*
2. *Либих, Ю. Химия в приложении к земледелию и физиологии растений / Ю. Либих. – М.: Директ-Медиа, 2013. – 450 с.*
3. *Влияние ассоциации агрономически ценных микроорганизмов на микрофлору деградированных почв / И.Э. Смирнова, А.К. Саданов, А.М. Нурмуханбетова, А.Ж. Султанова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 1-1. – С. 92–96.*
4. *Comparison of Soil Microbiome Diversity in Establishing an Agronomically Valuable Association for Agricultural Applications / A. Unitsky, V. Zayats, I. Naletov, N. Zyl // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 537. – 05030.*
5. *Jalali, M. Heavy Metal Contents, Soil-to-Plant Transfer Factors, and Associated Health Risks in Vegetables Grown in Western Iran / M. Jalali, A. Meyari // Journal of Food Composition and Analysis. – 2022. – Vol. 106. – 104316.*
6. *Bioaugmentation with Copper Tolerant Endophyte Pseudomonas lurida Strain EO026 for Improved Plant Growth and Copper Phytoremediation by Helianthus annuus / A. Kumar, Tripti, O. Voropaeva [et al.] // Chemosphere. – 2021. – Vol. 266. – 128983.*
7. *Юницкий, А.Э. Исторические предпосылки программы SpaceWay как единственного пути устойчивого развития цивилизации технократического типа / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 23–29.*
8. *Бороздина, И.Б. Микрофлора семян лекарственных растений / И.Б. Бороздина, И.М. Мануйлов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – № 9 (83). – С. 43–47.*
9. *Analysis of Rock and Sea Salts for Various Essential and Inorganic Elements / M. Nafees, N. Khan, S. Rukh, A. Bashir // Journal of Science and Technology. – 2013. – Vol. 37, iss. 1. – P. 9–20.*
10. *Dao, T.-K. A Review on the Role of Sea Salt in Food and Its Applications for Human Health / T.-K. Dao, T.-T. Nguyen, N.-T. Vu // Mini-Reviews in Organic Chemistry. – 2025. – Vol. 22, No. 2. – С. 214–225.*
11. *Цыганова, Н.А. Эффективность применения органических кислот на яровой мягкой пшенице / Н.А. Цыганова, Н.А. Воронкова // Агрохимический вестник. – 2020. – № 3. – С. 71–74.*
12. *Tryptophan-Dependent Production of Indole-3-Acetic Acid (IAA) Affects Level of Plant Growth Promotion by Bacillus amyloliquefaciens FZB42 / E.E. Idris, D.J. Iglesias, M. Talon, R. Borriss // Molecular Plant-Microbe Interactions. – 2007. – Vol. 20, iss. 6. – P. 619–626.*
13. *Biocontrol Mechanism by Root-Associated Bacillus amyloliquefaciens FZB42 – A Review / S.P. Chowdhury, A. Hartmann, X. Gao, R. Borriss // Frontiers in Microbiology. – 2015. – Vol. 6. – 780.*
14. *Structural and Functional Characterization of Gene Clusters Directing Nonribosomal Synthesis of Bioactive Cyclic Lipopeptides in Bacillus amyloliquefaciens Strain FZB42 / A. Koumoutsi, X.-H. Chen, A. Henne [et al.] // Journal of Bacteriology. – 2004. – Vol. 186, iss. 4. – P. 1084–1096.*
15. *Isolation and Characterization of Phosphate-Solubilizing Bacteria from Walnut and Their Effect on Growth and Phosphorus Mobilization / X. Yu, X. Liu, T.H. Zhu [et al.] // Biology and Fertility of Soils. – 2011. – Vol. 47, iss. 4. – P. 437–446.*
16. *Enhanced Plant Growth by Siderophores Produced by Plant Growth-Promoting Rhizobacteria / J.W. Kloepper, J. Leong, M. Teintze, M.N. Schroth // Nature. – 1980. – Vol. 286, iss. 5776. – P. 885–886.*
17. *Glick, B.R. Bacteria with ACC Deaminase Can Promote Plant Growth and Help to Feed the World / B.R. Glick // Microbiological Research. – 2014. – Vol. 169, iss. 1. – P. 30–39.*
18. *Haas, D. Biological Control of Soil-Borne Pathogens by Fluorescent Pseudomonads / D. Haas, G. Défago // Nature Reviews Microbiology. – 2005. – Vol. 3, iss. 4. – P. 307–319.*
19. *Larkin, M.J. Biodegradation and Rhodococcus – Masters of Catabolic Versatility / M.J. Larkin, L.A. Kulakov, C.C.R. Allen // Current Opinion in Biotechnology. – 2005. – Vol. 16, iss. 3. – P. 282–290.*
20. *Kästner, M. Application of Compost for Effective Bioremediation of Organic Contaminants and Pollutants*

in Soil / M. Kästner, A. Miltner // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2016. – Vol. 100, iss. 8. – P. 3433–3449.

21. *Takaichi, S. Carotenoids in Algae: Distributions, Biosyntheses and Functions / S. Takaichi // Marine Drugs. – 2011. – Vol. 9, iss. 6. – P. 1101–1118.*
22. *Canellas, L.P. Physiological Responses to Humic Substances as Plant Growth Promoter / L.P. Canellas, F.L. Olivares // Chemical and Biological Technologies in Agriculture. – 2014. – Vol. 1. – 3.*
23. *Rolland, F. Sugar Sensing and Signaling in Plants: Conserved and Novel Mechanisms / F. Rolland, E. Baena-Gonzalez, J. Sheen // Annual Review of Plant Biology. – 2006. – Vol. 57. – P. 675–709.*
24. *Kerr, R.G. Elucidation of the Biosynthetic Origin of the Anti-Inflammatory Pseudopterosins / R.G. Kerr, A.C. Kohl, T.A. Ferns // Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. – 2006. – Vol. 33, iss. 7. – P. 532–538.*
25. *Ruan, Y.L. Sucrose Metabolism: Gateway to Diverse Carbon Use and Sugar Signaling / Y.L. Ruan // Annual Review of Plant Biology. – 2014. – Vol. 65. – P. 33–67.*
26. *The Role of Soil Microorganisms in Plant Mineral Nutrition – Current Knowledge and Future Directions / R. Jacoby, M. Peukert, A. Succurro [et al.] // Frontiers in Plant Science. – 2017. – Vol. 8. – 1617.*
27. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants / ed. P. Marschner. – 3rd ed. – London: Academic Press, 2012. – 684 p.*
28. *Fredrickson, J.K. Genome-Assisted Analysis of Dissimilatory Metal-Reducing Bacteria / J.K. Fredrickson, M.F. Romine // Current Opinion in Biotechnology. – 2005. – Vol. 16, iss. 3. – P. 269–274.*
29. *Колупаев, Ю.Е. Участие оксида азота (NO) в трансдукции сигналов абиотических стрессоров у растений / Ю.Е. Колупаев, Ю.В. Карпец // Вісник Харківського національного аграрного університету. Серія: Біологія. – 2009. – N° 3 (18). – С. 6–19.*
30. *Glick, B.R. Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications / B.R. Glick // Scientifica. – 2012. – Vol. 2012. – 963401.*
31. *Spaepen, S. Auxin and Plant-Microbe Interactions / S. Spaepen, J. Vanderleyden // Cold Spring Harbor Perspectives in Biology. – 2011. – Vol. 3, iss. 4. – a001438.*
32. *White, P.J. Plant Nutrition for Sustainable Development and Global Health / P.J. White, P.H. Brown // Annals of Botany. – 2010. – Vol. 105, iss. 7. – P. 1073–1080.*
33. *Glick, B.R. Bacteria with ACC Deaminase Can Promote Plant Growth and Help to Feed the World / B.R. Glick // Microbiological Research. – 2014. – Vol. 169, iss. 1. – P. 30–39.*
34. *Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск: СтройМедиаПроект, 2025. – 532 с.*

УДК 579.64+629.7

Влияние азотфиксирующих бактерий на содержание азота в субстрате и растениях

Т.И. Пятакова

В.В. Корней

Е.В. Шерешовец

П.А. Буглак

ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

Исследование направлено на изучение воздействия штаммов азотфиксирующих бактерий, выделенных из мирового Банка почв uTerra, и некоторых микробиологических удобрений, различающихся по способности фиксации молекулярного азота из воздуха, на содержание общего азота и его минеральных форм в разных типах почв и растениях. Основная цель работы заключается в выявлении высокоэффективных интродуцированных штаммов бактерий-азотфиксаторов, демонстрирующих максимальную нитрогеназную активность, а также в определении оптимальных параметров почвенной среды, обеспечивающих их устойчивую жизнедеятельность и продуктивность.

Оценены способность штаммов фиксировать молекулярный азот из атмосферы, их адаптивность к разным почвенным характеристикам и влияние на агрохимические показатели грунта.
Новизна работы – в сравнении азотфиксирующих свойств бактерий при контролируемых условиях, а также в улучшении плодородия почв с помощью штаммов азотфиксирующих бактерий, которые могут быть эффективно интродуцированы в различные типы субстратов, включая те, что будут использоваться в орбитальном ЭкоКосмоДоме.
Практическая значимость данного эксперимента состоит в возможности оптимизации существующих продуктов линейки uTerra и последующей разработке новых биопрепаратов, содержащих отобранные штаммы бактерий и являющихся природной заменой минеральным удобрениям.

Ключевые слова:
азотфиксирующие бактерии, клубеньковые бактерии, почвенные микроорганизмы, содержание азота, ЭкоКосмоДом (ЭКД).

UDC 579.64+629.7

The Influence of Nitrogen-Fixing Bacteria on Nitrogen Content in Substrate and Plants

T. Pyatakova

V. Karnei

A. Sharashovets

P. Buglak

Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

The study aims to investigate the effects of nitrogen-fixing bacterial strains isolated from the uTerra world Bank of soils and certain microbiological fertilizers differing in their capacity to fix atmospheric molecular nitrogen, on the content of total nitrogen and its mineral forms in various soil and plant types. The main objective of the work is to identify highly effective introduced strains of nitrogen-fixing bacteria that demonstrate maximum nitrogenase activity, as well as to determine the optimal parameters of the soil environment that ensure their sustainable viability and productivity.

The paper evaluates the ability of strains to fix molecular nitrogen from the atmosphere, their adaptability to different soil characteristics, and their impact on agrochemical indicators of soil.
The novelty of the work lies in comparing the nitrogen-fixing properties of bacteria under controlled conditions, as well as in improving soil fertility using strains of nitrogen-fixing bacteria that can be effectively introduced into various types of substrates, including those that will be used in the orbital EcoCosmoHouse. The practical significance of the experiment consists in the potential optimization of existing products within the uTerra line and the subsequent development of new biological agents containing selected strains of bacteria that are a natural substitute for mineral fertilizers.

Keywords:
EcoCosmoHouse (ECH),
nitrogen content,
nitrogen-fixing bacteria,
nodule bacteria,
soil microorganisms.

Введение

Микробиологическая фиксация атмосферного азота – процесс, при котором почвенные микроорганизмы поглощают азот из атмосферы и преобразуют его в реакционноспособные соединения (нитраты, нитриты или аммоний). Растения могут легко усваивать данное вещество только в виде нитратов (NO_3^-) и аммония (NH_4^+). Дефицит азота замедляет рост культур и препятствует их здоровому развитию.

Содержание азота в атмосферном воздухе составляет 78,09 %. На 1 га поверхности Земли или воды приходится около 80 000 тонн азота, который недоступен большинству высших растений [1]. Примерно 90 % естественной фиксации этого вещества на нашей планете осуществляется биотическим путём посредством почвенных микроорганизмов [2].

Азотфиксирующие бактерии вырабатывают уникальный фермент, называемый нитрогеназой, который отвечает за фиксацию азота. Эти микроорганизмы обеспечивают растения усваиваемым азотом, поглощая его в газообразном состоянии из воздуха и выделяя в почву уже в форме аммония. Данный метод является единственным подходящим вариантом для сельскохозяйственных культур. Растения способны связывать азот с органическим веществом благодаря окислительным процессам в клетке, образуя при этом аминокислоты, затем посредством пептидной связи собирать различные цепочки полипептидов, участвующих в метаболических процессах и накоплении энергии.

Азотфиксирующие бактерии обогащают почву неорганическими азотсодержащими соединениями при помощи накопленного в биомассе азота. Такие микроорганизмы естественным путём повышают плодородие почвы, снижая потребности в туковых удобрениях [3].

В интенсивном земледелии азот обычно вносят в больших количествах перед основной высадкой растений. Из-за того, что вещество имеет свойство вымываться из почвы под действием талых вод, высокие дозы удобрения попадают в грунтовые воды и могут нанести вред окружающей среде.

Биологическая фиксация азота полезна для ведения устойчивого сельского хозяйства и сохранения экологического баланса. Симбиотические и свободноживущие бактерии могут улучшать структуру почвы, стимулировать фитогормоны и обеспечивать пролонгированное выделение азота. Симбиотические культуры требуют более низких затрат при выращивании, но не все растения образуют симбиотические корневые клубеньки с азотфиксирующими микроорганизмами.

Для несимбиотических культур практичным решением является использование азотфиксирующих бактериальных инокулятов, т. е. биопрепаратов, содержащих большое количество живых бактериальных организмов, способных к ускоренному выделению азота в почве на ранней стадии онтогенеза растений. Следовательно, применение азотфиксации при помощи микроорганизмов позволяет обогащать почву азотом без синтетических удобрений.

Типы азотфиксирующих микроорганизмов

Азотфиксирующие бактерии делятся на три основных типа: симбиотические клубеньковые, ассоциативные и свободноживущие (рисунок 1) [2].

а) б) в)

Рисунок 1 – Виды азотфиксирующих бактерий по типу взаимодействия с растениями: а – симбиотические клубеньковые; б – ассоциативные; в – свободноживущие

В таблице 1 представлены основные характеристики азотфиксирующих бактерий.

Таблица 1 – Характеристики азотфиксирующих микроорганизмов по типу взаимодействия с растениями

Характеристика	Симбиотические клубеньковые бактерии	Ассоциативные бактерии	Свободноживущие бактерии
Транспортация зафиксированного азота	Высокая степень	Средняя степень	Низкая степень
Примерное количество зафиксированного азота, кг/га в год	50–465	2–170	1–80

Проникновение симбиотических клубеньковых бактерий в растение-хозяина начинается с корневого волоска. После этого они мигрируют в клетки коры корня, где происходит интенсивное деление клеток микроорганизма, что приводит к формированию клубеньков. В результате данного процесса бактерии становятся бактероидами. Их образование связано с синтезом нитрогеназной ферментативной системы, которая важна в фиксации азота [4, 5].

Азотфиксация происходит в бактероидах, окружённых мембраной и расположенных в кортикальных клетках корня растения-хозяина. Фермент нитрогеназа, играющий ключевую роль в этом процессе, разрушается в присутствии кислорода. Для предотвращения этого у азотфиксирующих бактерий есть несколько защитных механизмов, одним из которых является белок легоглобин. Он синтезируется клетками растения, встраивается в мембрану бактероида и осуществляет доставку кислорода. В бактероидах также функционирует цикл Кребса, который обеспечивает нитрогеназу электронами и поставляет кетокислоты. Они реагируют с ионами аммония, образуя аминокислоты, которые затем транспортируются в клетки растения [6]. Однако не все культуры могут вступать в симбиоз с бактериями и формировать клубеньки, следовательно, исходя из типа растения, стоит выбирать ассоциативные или свободноживущие бактерии.

Цель работы – определение наиболее эффективных интродуцированных в почву бактерий азотфиксаторов, показывающих высокий уровень нитрогеназной активности.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили агрономически ценные микроорганизмы, полученные из мирового Банка почв uTerra (Крестьянское (фермерское) хозяйство «Юницкого», г. Марьина Горка, Беларусь) и обладающие комплексом полезных свойств: фосфатмобилизирующие (*Bacillus* spp., *Stenotrophomonas* spp., *Lipomyces starkeyi* БИМ Y-120, *Bacillus amyloliquefaciens* БИМ B-1236), целлюлозолитические (*Lelliottia* spp., *Citrobacter* spp., *Aeromonas* spp., *Bacillus* spp., *Paeniclostridium* spp.) и азотфиксирующие (*Rhodococcus rhodochrous*, *Pseudomonas aurantiaca* B-162, клубеньковые бактерии клевера (*Rhizobium trifolii*), гороха (*Rhizobium leguminosarum*) и фасоли (*Rhizobium phaseoli*)), выделенные отделом биотехнологий ЗАО «Струнные технологии» (г. Минск, Беларусь) (рисунок 2) [7, 8].

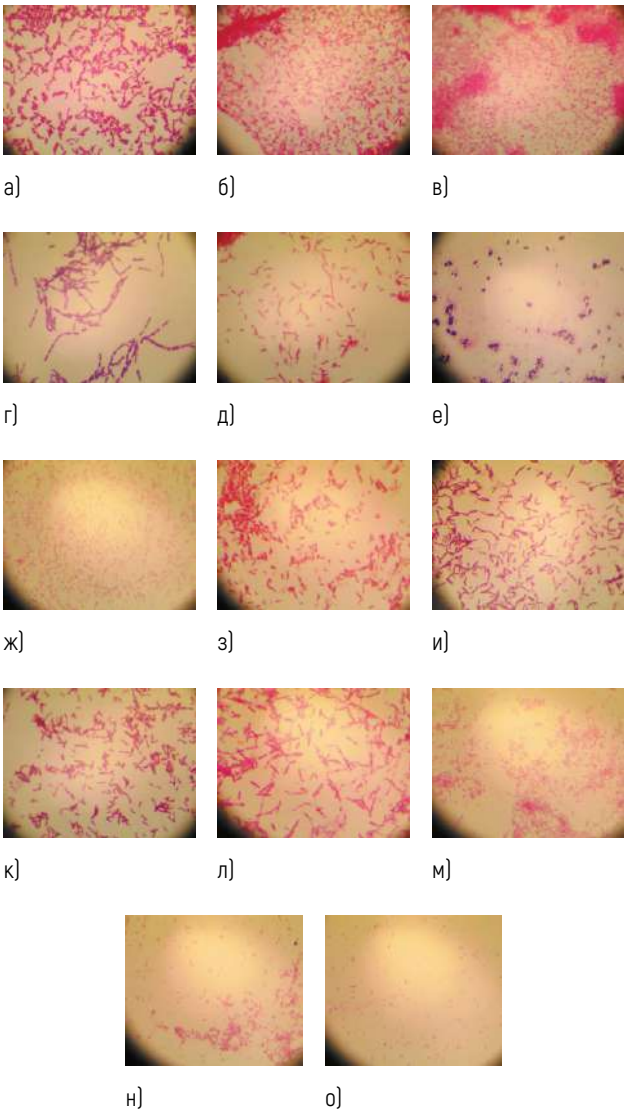


Рисунок 2 – Окрашенные культуры микроорганизмов под микроскопом:
а – *Lelliottia* spp.; б – *Citrobacter* spp.; в – *Aeromonas* spp.;
г – *Bacillus* spp. (целлюлозолитический); д – *Paeniclostridium* spp.;
е – *Bacillus amyloliquefaciens* БИМ B-1236; ж – *Stenotrophomonas* spp.;
з – *Bacillus* spp. (фосфатмобилизирующий);
и – *Lipomyces starkeyi* БИМ Y-120; к – *Rhodococcus rhodochrous*;
л – *Pseudomonas aurantiaca* B-162; м – *Rhizobium trifolii*;
н – *Rhizobium leguminosarum*; о – *Rhizobium phaseoli*

Бактерии культивировали в жидкой питательной среде (ГРМ-бульон) при постоянном перемешивании со скоростью 180 об/мин в течение 72 ч при температуре 30 °С.

Для производства качественного инокулята тщательно проанализировано взаимодействие микроорганизмов, чтобы избежать возможного угнетения одних бактерий другими.

На основе полученных данных сформированы группы совместимых штаммов (культуральные жидкости 1–4), не оказывающих негативного влияния друг на друга:

1) *Pseudomonas aurantiaca* B-162, *Bacillus amyloliquefaciens* БИМ B-1236, *Lipomyces starkeyi* БИМ Y-120, *Lelliottia* spp., *Paeniclostridium* spp., *Bacillus* spp. (целлюлозолитический), *Rhizobium trifolii*, *Rhizobium leguminosarum*, *Rhizobium phaseoli*;

2) *Rhodococcus rhodochrous*, *Bacillus* spp. (фосфатмобилизирующий), *Stenotrophomonas* spp., *Citrobacter* spp., *Paeniclostridium* spp., *Bacillus* spp. (целлюлозолитический), *Rhizobium trifolii*, *Rhizobium leguminosarum*, *Rhizobium phaseoli*;

3) *Rhodococcus rhodochrous*, *Bacillus amyloliquefaciens* БИМ B-1236, *Lipomyces starkeyi* БИМ Y-120, *Citrobacter* spp., *Lelliottia* spp., *Paeniclostridium* spp., *Rhizobium trifolii, Rhizobium leguminosarum*, *Rhizobium phaseoli*;

4) *Lelliottia* spp., *Citrobacter* spp., *Aeromonas* spp., *Bacillus* spp. (фосфатмобилизирующий), *Paeniclostridium* spp., *Bacillus amyloliquefaciens* БИМ B-1236, *Stenotrophomonas* spp., *Bacillus* spp. (целлюлозолитический), *Lipomyces starkeyi* БИМ Y-120, *Rhodococcus rhodochrous*, *Pseudomonas aurantiaca* B-162, *Rhizobium trifolii*, *Rhizobium leguminosarum*, *Rhizobium phaseoli*.

Расчёт содержания азота в инокулятах выполнялся по стандартной методике определения общего азота (метод Кьельдаля).

Исследование проводили на твёрдых субстратах: торфяном и торфяно-песчаном (соотношение торфогрунта и песка 1 : 1). Кроме перечисленных инокулятов использовались популярные микробиологические препараты:

- Profit «ПочвоУлучшитель Aqua» (ООО «ПрофитГарден», Беларусь);
- эликсир плодородия uTerra (Крестьянское (фермерское) хозяйство «Юницкого», Беларусь);
- «Байкал ЭМ-1» (ООО «НПО ЭМ-Центр», Россия).

Сухой грунт объёмом 1 л помещали в горшок и увлажняли до 80 %, после чего накрывали плёнкой, в которой были проделаны отверстия. В опытные образцы вносили инокулят объёмом 50 мл, в контрольные (H_2O) – 50 мл стерильной воды, в контрольные (МП) – 50 мл микробиологического препарата, разведённого в соотношении 1 : 100, как указано на упаковке.

Определение численности микроорганизмов, а также содержания азота для опытных и контрольных образцов проводилось через одну, четыре и восемь недель.

После высаживали декоративное растение – подсолнечник обыкновенный (*Helianthus annuus* L.) сорта Медвежонок Тедди. Измерение азота в почве выполнялось через две и четыре недели; у подсолнечника – на четвёртой неделе.

Результаты исследования

Перед началом всех испытаний определены численность микроорганизмов и количество азота в каждом из штаммов, а также начальное значение этих показателей в микробиологических препаратах. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Численность микроорганизмов и количество азота в штаммах и микробиологических препаратах на начало исследования

Состав пробы	Численность микроорганизмов, КОЕ/мл	Количество азота, г/кг
ГРМ-бульон (контроль по азоту)	–	68,89
«Байкал ЭМ-1» (контроль по азоту)	3×10^8	0,4
Profit «ПочвоУлучшитель Aqua» (контроль по азоту)	9×10^7	2,1
Эликсир плодородия uTerra (контроль по азоту)	2×10^9	21,18
Lelliottia spp.	8×10^6	51,57
Citrobacter spp.	2×10^7	62,51
Aeromonas spp.	3×10^7	64,6
Bacillus spp. (целлюлозолитический)	2×10^7	75,57
Paeniclostridium spp.	2×10^7	64,29
Bacillus amyloliquefaciens БИМ B-1236	2×10^7	84,02
Stenotrophomonas spp.	2×10^7	87,13
Bacillus spp. (фосфатмобилизирующий)	1×10^7	91,51
Lipomyces starkeyi БИМ Y-120	9×10^6	41,41
Rhodococcus rhodochrous	2×10^7	57,49
Pseudomonas aurantiaca B-162	1×10^7	40,54
Rhizobium trifolii	2×10^7	48,88
Rhizobium leguminosarum	3×10^7	75,36
Rhizobium phaseoli	3×10^7	37,93

Наиболее эффективная фиксация азота наблюдается в следующих микроорганизмах: *Bacillus* spp. (целлюлозолитический) (+10 %), *Rhizobium leguminosarum* (+22 %), *Bacillus amyloliquefaciens* БИМ В-1236 (+27 %), *Stenotrophomonas* spp. (+33 %), *Bacillus* spp. (фосфатмобилизирующий) (+9 %). В то же время другие штаммы показали результаты ниже контрольного уровня, что позволяет предположить более высокое потребление азота по сравнению с перечисленными микроорганизмами. Это свидетельствует о том, что штаммы находятся в активной фазе роста и размножения, а также могут обладать более интенсивным обменом веществ, чем другие бактерии.

При проведении количественного анализа микробных сообществ отмечены существенные различия в динамике развития микроорганизмов. Особый интерес представляют образцы культуральной жидкости 3 и препарата uTerra на торфяном грунте, которые продемонстрировали устойчивый, хотя и умеренный прирост численности микроорганизмов в течение восьми недель. Это можно рассматривать как показатель их высокой степени адаптации к специфическим условиям торфяных субстратов.

Препарат uTerra проявил себя как сбалансированная микробная система, что свидетельствует об оптимальном подборе штаммов и способности к длительному поддержанию метаболической активности.

У всех остальных образцов зафиксирована стабильная численность микроорганизмов, указывающая на то, что для их роста и развития были созданы необходимые условия, такие как температура, влажность, наличие питательных веществ и отсутствие неблагоприятных факторов, угрожающих жизнедеятельности. Кроме того, возможно, в системе достигнуто равновесие между процессами размножения микроорганизмов и их естественной смертью.

После высадки растений численность микроорганизмов оставалась стабильной – это признак гармоничного взаимодействия между растительной экосистемой и сообществом бактерий. Присутствие растений не нарушило баланс микробиоты грунта, а, напротив, способствовало поддержанию его гомеостаза. Подобная стабильность подчёркивает важность симбиотических отношений между растениями и почвенными микроорганизмами.

Диаграмма, представленная на рисунке 3, демонстрирует динамику изменения содержания азота в торфяном грунте после внесения микробиологических препаратов и культуральных жидкостей. Исходно количество азота в образцах с культуральными жидкостями 3 и 4 составляло 7,25 и 7,79 г/кг соответственно, что существенно превышало контроль (H_2O) (4,01 г/кг). Однако к концу эксперимента наблюдалось снижение до 6,44 г/кг (–11,2 %) и 6,06 г/кг (–22,2 %), при этом конечные значения оставались больше контрольного показателя (5,43 г/кг). Вероятной причиной уменьшения концентрации азота является вымывание нитратов из верхних слоёв почвы, что ограничило его доступность для растений.

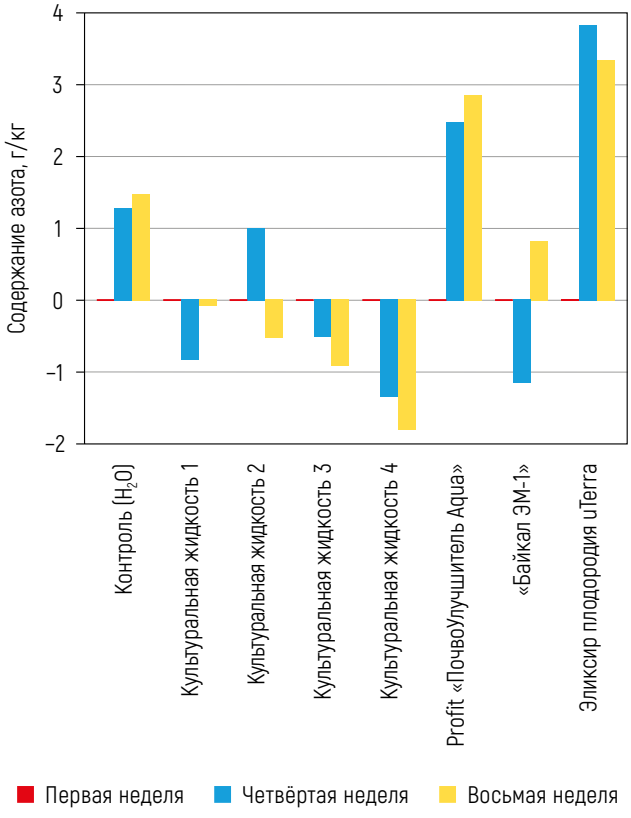


Рисунок 3 – Динамика изменения содержания азота в торфяном грунте после применения микробиологических препаратов и культуральных жидкостей

Образец с препаратом «Байкал ЭМ-1» продемонстрировал устойчивый рост количества азота с 5,73 до 6,59 г/кг (+15 %) в течение эксперимента, что превышает прирост в контрольной группе (+35,4 %). При этом начальный уровень азота был более существенным, чем у контрольного варианта.

Культуральная жидкость 1 характеризовалась высоким исходным содержанием азота (7,35 г/кг) с некоторым уменьшением к восьмой неделе до 7,31 г/кг (–0,5 %). Несмотря на минимальные колебания, конечный результат оставался больше контрольного уровня (+34,6 %).

Образец с культуральной жидкостью 2 показал прирост концентрации азота в почве: 7,27 г/кг. Однако к концу эксперимента зафиксирован спад до 5,85 г/кг (–19,5 %), что лишь ненамного превышало контрольное значение (5,43 г/кг). Такое снижение может быть связано с иммобилизацией азота микроорганизмами. На определённых стадиях эксперимента активность почвенных микроорганизмов могла привести к потреблению доступных форм азота для их роста и размножения. Гетеротрофные микроорганизмы, особенно в присутствии органического материала, используют нитраты и аммоний в качестве источника питания, временно связывая азот в своих клетках.

Препарат Profit «ПочвоУлучшитель Aqua» продемонстрировал стабильный и постепенный рост уровня азота в почве на протяжении эксперимента – с 3,83 до 6,76 г/кг, что соответствует увеличению на 76,5 %. Этот показатель на 35,4 % превышает прирост в контрольной группе.

В случае применения препарата uTerra наблюдалось наибольшее изменение содержания азота – с 2,24 до 6 г/кг (+167,9 %), существенно превосходящее контрольное значение. Однако к концу эксперимента произошло снижение до 5,67 г/кг (–5,5 %), что всё равно оставалось выше контрольного показателя (5,43 г/кг). Это может быть связано с денитрификацией, когда нитраты (NO_3^-) преобразуются в газообразный азот (N_2) или оксиды азота (например, N_2O) под воздействием денитрифицирующих бактерий. Такой процесс свойствен для анаэробных условий, которые могли возникнуть в почве, что и привело к потерям азота.

На рисунке 4 представлена динамика изменения агрохимических характеристик в торфяно-песчаном грунте после внесения микробиологических препаратов и культуральных жидкостей. В контрольном образце (H_2O) наблюдалось естественное увеличение содержания азота с 1,06 г/кг на первой неделе до 3,79 г/кг на восьмой неделе, что соответствует приросту на 2,73 г/кг (+257 %).

В отличие от контроля образец с культуральной жидкостью 2 продемонстрировал противоположную динамику. Начальное количество азота составляло 11,35 г/кг, что в 10,7 раза превышало контрольное значение на первой неделе. Однако к восьмой неделе эксперимента произошло резкое снижение данного показателя до 2,23 г/кг, соответствующее уменьшению на 9,12 г/кг (–80 %). С большой вероятностью это связано с вымыванием нитратов из верхних слоёв почвы, что существенно ограничило доступность азота для растений.

При применении культуральной жидкости 1 резко снизилось содержание азота с 6,25 до 1,84 г/кг (–70,5 %), причём конечное значение оказалось на 51,5 % ниже контрольного. Культуральная жидкость 3 также продемонстрировала уменьшение показателя с 3,04 до 2,12 г/кг (–30,3 %) с конечным значением на 44 % ниже контрольного. Однако в обоих случаях при завершении эксперимента отмечалось небольшое увеличение. Это позволяет предположить, что сначала бактерии активно потребляли доступные формы азота для собственного роста и метаболизма, что типично для гетеротрофных микроорганизмов, а к концу эксперимента присутствующие азотфиксирующие бактерии начали активную фиксацию азота после периода адаптации.

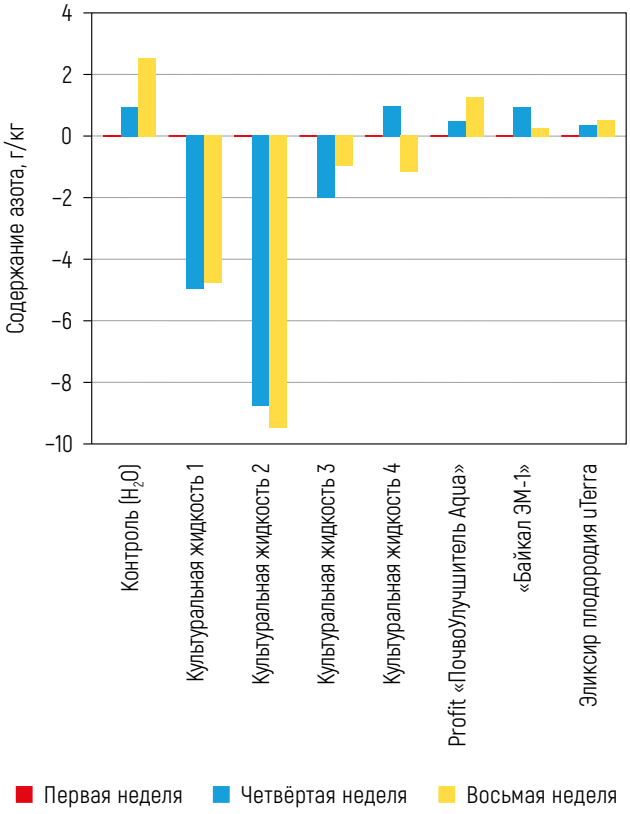


Рисунок 4 – Динамика изменения содержания азота в торфяно-песчаном грунте после применения микробиологических препаратов и культуральных жидкостей

У образцов с препаратом «Байкал ЭМ-1» и культуральной жидкостью 4 зафиксирована иная динамика: наблюдался подъём количества азота в почве, а затем последовал спад. В отличие от контроля образец с культуральной жидкостью 4, несмотря на изначально более высокое содержание азота (2,8 г/кг), к восьмой неделе снизил данный показатель до 2,04 г/кг, что на 46 % меньше контрольного. Препарат «Байкал ЭМ-1» продемонстрировал схожую,

но не столь выраженную динамику. Начальный уровень азота (1,51 г/кг) увеличился до 1,9 г/кг к середине эксперимента, но после упал до 1,65 г/кг к окончанию. Хотя формально зафиксирован незначительный прирост на 9 %, финальный результат оказался меньше контрольного на 56 %. Это может свидетельствовать о процессе разложения органических веществ в почве, вследствие чего происходило высвобождение азота в формах аммония (NH_4^+) и нитратов (NO_3^-). Первоначальное увеличение азота связано с активной минерализацией органического материала, однако последующее снижение, вероятно, обусловлено вымыванием нитратов или их интенсивным потреблением микроорганизмами.

Препараты Profit и uTerra продемонстрировали постепенный рост содержания азота в почве, что закономерно, особенно для эликсира плодородия uTerra, поскольку его состав характеризуется высокой концентрацией почвенных микроорганизмов – не менее 1 трлн клеток в 1 л. Высокая численность бактерий способствует активному участию в процессах минерализации органических соединений, что обеспечивает стабильное пополнение доступного азота в почве.

В таблице 3 представлены результаты химического анализа подсолнечника. На торфяном грунте наблюдается значительное увеличение присутствия азота при использовании культуральных жидкостей 1 (+16,3 г/кг), 2 (+18,4 г/кг), 4 (+17,3 г/кг) и эликсира плодородия uTerra (+16,3 г/кг), что свидетельствует о положительном воздействии этих добавок на питание растений азотом. Минимальный прирост азота зафиксирован при применении продуктов «Байкал ЭМ-1» (+3,9 г/кг) и Profit «ПочвоУлучшитель Aqua» (+3,7 г/кг), что указывает на их ограниченное влияние на азотный статус растений в данных условиях.

На торфяно-песчаном грунте также отмечается увеличение уровня азота при использовании культуральных жидкостей 1 (+16,7 г/кг), 2 (+12,4 г/кг), 4 (+11 г/кг) и эликсира плодородия uTerra (+16,7 г/кг), что положительно сказалось на растениях. Примечательно, что удобрение uTerra сохраняет высокую эффективность на разных типах почв. Это подчёркивает не только его адаптивность, но и универсальность механизмов действия. Подобная стабильность, скорее всего, обусловлена комплексным составом препарата, включающим высокоактивные штаммы микроорганизмов, а также многофакторным влиянием на азотный метаболизм растений. Важно отметить, что Profit «ПочвоУлучшитель Aqua» показал нулевой прирост азота на этом типе грунта, что может свидетельствовать об отсутствии универсального действия.

Таблица 3 – Содержание азота в подсолнечнике

Наименование пробы	Азот, г/кг	Изменение по отношению к контролю, г/кг
Торфяной грунт		
Контроль (H_2O)	24,6	–
Культуральная жидкость 1	40,9	+16,3
Культуральная жидкость 2	43	+18,4
Культуральная жидкость 3	31,1	+6,5
Культуральная жидкость 4	41,9	+17,3
Profit «ПочвоУлучшитель Aqua»	28,3	+3,7
«Байкал ЭМ-1»	28,5	+3,9
Эликсир плодородия uTerra	40,9	+16,3
Торфяно-песчаный грунт		
Контроль (H_2O)	14	–
Культуральная жидкость 1	30,7	+16,7
Культуральная жидкость 2	26,4	+12,4
Культуральная жидкость 3	18	+4
Культуральная жидкость 4	25	+11
Profit «ПочвоУлучшитель Aqua»	14	0
«Байкал ЭМ-1»	20	+6
Эликсир плодородия uTerra	30,7	+16,7

Оптимальные результаты по увеличению содержания азота в почве с растениями (таблица 4) зафиксированы в образцах на торфяном грунте с применением препаратов Profit (+8,6 г/кг) и uTerra (+8,5 г/кг), которые способствовали максимальному приросту. На торфяно-песчаном грунте лидерство также осталось за Profit «ПочвоУлучшитель Aqua», обеспечившим прирост 5 г/кг. Наименьший эффект наблюдался на торфяно-песчаном грунте в контрольной группе (H_2O) (+0,3 г/кг) и при использовании культуральной жидкости 4 (+1 г/кг), что демонстрирует минимальное улучшение азотного баланса.

Таблица 4 – Содержание азота в почве с растениями

Наименование пробы	Начало эксперимента, г/кг	Конец эксперимента, г/кг	Изменение, г/кг
Торфяной грунт			
Контроль (H_2O)	6,9	8,3	+1,4
Культуральная жидкость 1	7,5	12,5	+5
Культуральная жидкость 2	6,9	10,8	+3,9
Культуральная жидкость 3	7	14,2	+7,2
Культуральная жидкость 4	7	9,6	+2,6
Profit «ПочвоУлучшитель Aqua»	6,4	15	+8,6
«Байкал ЭМ-1»	6,5	11,2	+4,7
Эликсир плодородия uTerra	5,2	13,7	+8,5
Торфяно-песчаный грунт			
Контроль (H_2O)	5,2	5,5	+0,3
Культуральная жидкость 1	3,6	5	+1,4
Культуральная жидкость 2	4	5,32	+1,3
Культуральная жидкость 3	5,9	6,7	+0,8
Культуральная жидкость 4	2,4	3,4	+1
Profit «ПочвоУлучшитель Aqua»	1,7	6,7	+5
«Байкал ЭМ-1»	4,3	5,6	+1,3
Эликсир плодородия uTerra	2,3	5,9	+3,6

Таким образом, удобрения Profit и uTerra характеризуются наибольшей результативностью в обогащении почвы азотом, особенно в условиях торфяных грунтов, что подтверждает их ценность для повышения агрохимических показателей почвы.

Заключение

Проведённое исследование позволило выявить наиболее эффективные азотфиксирующие бактерии, которые, обладая высокой нитрогеназной активностью, продемонстрировали значительный потенциал в улучшении качества почвы. Применение данных микроорганизмов может играть ключевую роль в оптимизации агротехнологических процессов, особенно в условиях инновационных проектов, таких как ЭкоКосмоДом, где устойчивое использование ограниченных ресурсов считается приоритетной задачей.

Наилучшие показатели зафиксированы при внесении в почву следующих микроорганизмов: *Bacillus* spp. (фосфатмобилизирующий), *Stenotrophomonas* spp., *Bacillus amyloliquefaciens* БИМ В-1236, *Bacillus* spp. (целлюлозолитический), *Rhizobium leguminosarum*. В торфяном грунте с растениями выраженный эффект достигнут при внесении культуральной жидкости 3, что подчёркивает её перспективность как биологического средства для повышения урожайности. На торфяно-песчаном грунте хороший результат продемонстрировали только готовые микробиологические препараты Profit и uTerra. Исследования выявили, что Profit стимулирует развитие полезной почвенной микрофлоры и активизирует азотный обмен, тогда как uTerra воздействует комплексно, существенно совершенствуя агрофизические свойства и повышая продуктивность почвы.

Примечательно, что в субстратах без растений культуральные жидкости не показали значимой активности, однако микробиологические препараты Profit и uTerra продолжали демонстрировать высокий уровень эффективности, особенно на торфяно-песчаном грунте. Это подчёркивает их потенциал в качестве базовых компонентов для восстановления почвенных экосистем.

Кроме того, имелись различия в накоплении азота растениями в зависимости от типа субстрата. На торфяном грунте лучшие характеристики наблюдались при использовании культуральных жидкостей 1, 2 и 4, а также препарата uTerra, тогда как на торфяно-песчаном грунте наиболее действенными оказались культуральная жидкость 1 и эликсир плодородия uTerra. Полученные данные свидетельствуют о необходимости адаптации культуральных жидкостей к специфике почв для достижения максимального эффекта.

Таким образом, результаты исследования подтверждают перспективность применения азотфиксирующих бактерий и микробиологических препаратов для повышения плодородия почв и улучшения условий культивирования растений. Комплексные препараты, включающие азотфиксирующие штаммы, обеспечивают на 50 % и более выраженный положительный эффект по фиксации азота по сравнению с использованием только азотфиксаторов. Это позволяет создавать универсальные средства, действенные в разнообразных агроэкологических условиях.

Список основных источников

1. *Блинова, Е.А. Влияние азотфиксирующих бактерий на накопление азота в почве / Е.А. Блинова, А.И. Титовская // Горинские чтения. Инновационные решения для АПК: материалы междунар. студенч. конф., Майский, 18–19 марта 2020 г.: в 4 т. / М-во сельск. хоз-ва Рос. Федерации, ФГБОУ ВО «Белгород. гос. аграр. ун-т им. В.Я. Горина». – Майский, 2020. – Т. 1. – С. 3.*
2. *Черлинка, В. Азотфиксация у растений и бактерий для развития культур / В. Черлинка // EOS Data Analytics. – URL: https://eos.com/ru/blog/azotfiksacziya/. – Дата публ.: 02.02.2024.*
3. *Изучение активности микробиоты почвы при высоком содержании солей / А.Э. Юницкий, Т.И. Пятакова, В.В. Корней [и др.] // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 274–285.*
4. *Юницкий, А.Э. Фиксация азота клубеньками гороха посевного (Pisum sativum L.) при помощи азотфиксирующих бактерий, выделенных из почв различных регионов / А.Э. Юницкий, И.А. Налетов, В.С. Заяц // Сахаровские чтения 2024 года: экологические проблемы XXI века: материалы 24-й междунар. науч. конф., Минск, 23–24 мая 2024 г.: в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, УО «Междунар. гос. эколог. ин-т им. А.Д. Сахарова» Белорус. гос. ун-та; редкол: А.Н. Батян [и др.]; под общ. ред. О.И. Родькина, М.Г. Герменчук. – Минск, 2024. – Ч. 2. – С. 67–70.*
5. *Ассоциация агрономически ценных микроорганизмов для улучшения плодородия земель / В.С. Заяц, Н.С. Зыль, И.В. Налетов, Т.И. Пятакова // Микробные биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты: материалы XIII междунар. науч. конф., Минск, 6–9 июня 2023 г. / НАН Беларуси, Отд-ние биолог. наук [и др.]; орг. ком.: А.А. Шепелев (пред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 266–267.*
6. *Полевой, В.В. Физиология растений: учебник / В.В. Полевой. – М.: Высш. шк., 1989. – 464 с.: цв. ил.*
7. *Юницкий, А.Э. Почва и почвенные микроорганизмы в биосфере ЭкоКосмоДома / А.Э. Юницкий, Е.А. Соловьёва, Н.С. Зыль // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 179–183.*
8. *Биоутилизация органических остатков при помощи микроорганизмов / А.Э. Юницкий, Т.И. Пятакова, К.А. Бойко, И.В. Налетов // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 390–399.*

УДК 631.87+629.7

Влияние азотфиксаторов на хозяйственную ценность пшеницы мягкой и целесообразность их применения в условиях ЭкоКосмоДома

М.Д. Ракова

Т.И. Пятакова

И.В. Налетов

ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

Анализ микробиома из мирового Банка почв uTerra (г. Марьина Горка, Беларусь) позволит оценить устойчивость различных полезных микроорганизмов к меняющейся окружающей среде, а также выделить их в чистую культуру. Это важно, поскольку почвенные микроорганизмы способствуют повышению качества растительной продукции, урожайности сельскохозяйственных культур, улучшая их здоровье и адаптацию к стрессовым факторам, что особенно ценно при наличии сильного антропогенного воздействия.

Цель исследования – определить влияние азотфиксирующих микроорганизмов на рост и развитие пшеницы мягкой (*Triticum aestivum* L.) для их использования в условиях ЭкоКосмоДома (ЭКД).

На основе микроорганизмов, выделенных из мирового Банка почв uTerra, получены инокуляты, которые вносились в качестве подкормки в питательный субстрат для выращивания пшеницы. Наиболее результативным бактериологическим штаммом из изученных оказался AF3Эш. В то же время определёнными преимуществами обладали другие штаммы, поэтому для максимального эффекта необходимо рассматривать их совместное применение. Из эксперимента следует, что бактериологические инокуляты являются действенным биоудобрением и положительно отражаются на ростовых показателях культур, а значит, могут быть рекомендованы для использования в ЭКД.

Ключевые слова:
биологическое удобрение, почвенные микроорганизмы, пшеница мягкая (Triticum aestivum L.), развитие, рост.

UDC 631.87+629.7

Influence of Nitrogen-Fixing Microorganisms on the Economic Value of Soft Wheat and Feasibility of Their Use in EcoCosmoHouse Conditions

M. Rakova

T. Pyatakova

I. Naletov

Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

Analyzing the microbiome from the world Bank of soils uTerra (Maryina Gorka, Belarus) will help to assess the resilience of various beneficial microorganisms to environmental changes and allow to isolate them into pure cultures. This is important because soil microorganisms significantly enhance plant product quality and boost agricultural crop yields by improving plant health and increasing resistance to stress factors – especially crucial in the context of strong anthropogenic impact.

The aim of this study is to determine the impact of nitrogen-fixing microorganisms on the growth and development of soft wheat (*Triticum aestivum* L.) for use in the EcoCosmoHouse (ECH) conditions.

In the research, there were derived inoculants from microorganisms isolated from the world Bank of soils uTerra, which were then added as fertilizers to the nutrient substrate for growing wheat. Among the strains studied, AF3Ash emerged as the most effective, although other strains also offered specific advantages. For maximum effectiveness, the combined use of these strains should be considered.
The experiment demonstrates that bacteriological inoculants can serve as effective biofertilizers, positively influencing crop growth indicators and making them a recommendation for use in the ECH.

Keywords:
biological fertilizer, development, growth, soft wheat (Triticum aestivum L.), soil microorganisms.

Введение

Зерновые культуры – основа продовольственного обеспечения населения во всём мире. Среди злаковых первое место как по объёму производства, так и по площади выращивания занимает пшеница, за ней следуют кукуруза, рис и ячмень. Пшеница богата углеводами, особенно крахмалом, содержит белки, пищевые волокна, витамины группы В и минералы: железо, магний, фосфор и цинк [1].

Высокая продуктивность зерновых культур во многом определяется состоянием почвы и её биологической активностью. В одном килограмме здоровой плодородной почвы находится около триллиона почвенных микроорганизмов нескольких тысяч видов, что является важным для функционирования флоры и фауны в земной биосфере [2].

Применение органического питания и наличие всех необходимых минеральных составляющих, а также агрономически ценных почвенных микроорганизмов имеет решающее значение для сельскохозяйственного производства. В зерновых культурах доступность минеральных веществ влияет на урожайность, эффективность усвоения азота и содержание белка [3]. Однако чрезмерное использование синтетических удобрений приводит к дисбалансу трёх основных питательных элементов: азота, калия и фосфора, вызывает ускоренное разложение гумуса и снижение количества ценных микроорганизмов в почве. Исследования показали, что растения не усваивают вносимые ежегодно миллионы тонн синтетических удобрений [4]. Избыточное количество азота и фосфора, попадающее в почву, провоцирует её засоление, обуславливает образование парниковых газов в атмосфере и эвтрофикацию в водных системах.

Каждый год 12 млн га сельскохозяйственных земель подвергаются деградации и выводятся из эксплуатации. Для того чтобы обеспечить продовольственную безопасность и долгосрочное развитие, аграрному сектору необходимо перейти к интеллектуальному земледелию, эффективному использованию ресурсов, снижению загрязнения окружающей среды и повышению стабильности производственных систем [3]. Точное управление питательными веществами является ключом к устойчивому сельскому хозяйству. Следует внедрять методы, которые могут повысить урожайность без применения чрезмерного количества химических удобрений. Требуется новый подход к разработке экологически чистых средств, способных безопасно стимулировать рост возделываемых культур [5].

Данная идея становится основной при ведении земледелия в ЭкоКосмоДоме (ЭКД), так как в нём предполагается создание замкнутых экосистем, в которых соблюдение оптимальных условий для жизнедеятельности человека и осуществления хозяйственной деятельности приобретает особое значение.

Важный аспект функционирования ЭКД – использование исключительно экологически чистых удобрений и подкормок. Это определяет актуальность научных разработок в области биоудобрений, одним из примеров которых является продукция uTerra, направленная на повышение эффективности и безопасности сельскохозяйственного производства.

Биоудобрения могут содержать:

- бактерии, растворяющие фосфаты;
- азоспириллы;
- микроорганизмы, стимулирующие рост культур, в частности азотфиксаторы, которые защищают растения от биотических и абиотических стрессов и поддерживают доступность питательных веществ.

Правильное и целесообразное применение микробиологических препаратов имеет важное значение для повышения плодородия, сохранения микробиологической экологии, улучшения питания почвы и поддержки физиологических и биохимических процессов в растениях, что приводит к повышению урожайности при одновременном снижении зависимости от дорогостоящих и токсичных агрохимикатов.

На сегодняшний день многочисленные биоудобрения для различных условий окружающей среды и сельскохозяйственных культур успешно внедрены в производство [6]. Однако значительным препятствием на пути широкого распространения таких средств является недостаток знаний об их выборе и правильном использовании. Следовательно, существует острая необходимость в популяризации среди фермерских сообществ информации о научных методах отбора и применения биопрепаратов на основе микроорганизмов в соответствии с их естественной средой обитания и сельскохозяйственными культурами.

Таким образом, изучение и внедрение подобных препаратов актуально для обеспечения высокой урожайности, улучшения пищевой ценности растений и поддержания оптимального количества питательных веществ в почве.

В настоящем исследовании рассмотрены свободноживущие диазотрофы. К данной группе относятся бактерии родов *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Agrobacterium*, *Klebsiella*,

Bacillus, *Enterobacter* и др. [7]. Присутствие азотфиксирующих бактерий способствует фиксации атмосферного азота и его превращению в азотные соединения, полезные для растений; особое значение это имеет в замкнутой экосистеме.

Цель исследования – определить влияние азотфиксирующих микроорганизмов на рост и развитие пшеницы мягкой (*Triticum aestivum* L.) для их использования в условиях ЭКД.

Материалы и методы исследования

Объект исследования – пшеница мягкая, семена которой предварительно проращивались при температуре 15 °С в течение пяти дней. Опыт проводился в трёхкратной повторности для каждого анализируемого микробиологического штамма.

Для постановки эксперимента использовались следующие штаммы азотфиксирующих микроорганизмов: AF2Эш, AF2A2, AF3Эш, AF4Эш, AF4A2, а также вариант со всеми штаммами вместе. В качестве контроля выступала безазотная среда Эллиса ($MgSO_4$ – 5 г/л; KH_2PO_4 – 3 г/л; хелат – 5 г/л; $MnSO_4$ – 0,02 г/л; $CuSO_4$ – 0,01 г/л; $ZnSO_4$ – 0,01 г/л). Бактерии выделялись из образцов, хранящихся в мировом Банке почв uTerra (г. Марьина Горка, Беларусь), который создан по инициативе А.Э. Юницкого. Для получения микробиологических инокулятов анализируемые штаммы культивировали в среде Эшби (маннит – 20 г/л; K_2HPO_4 – 0,2 г/л; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,2 г/л; NaCl – 0,2 г/л; K_2SO_4 – 0,1 г/л; $CaCO_3$ – 5 г/л; агар – 20 г/л) в термостате при температуре 32 °С в течение 24 ч.

Готовые бактериологические инокуляты объёмом 100 мл добавляли в модифицированную среду Эллиса объёмом 300 мл, не содержащую азот. Пророщенные семена пшеницы помещали в ёмкости с питательной средой и хранили на стеллажах при температуре 25 °С и 16-часовом фотопериоде. Длительность эксперимента составила 30 дней.

По завершении опыта определялись следующие ростовые показатели:

- высота надземной части и длина корневой системы – при помощи мерной ленты;
- сырая масса – на аналитических весах;
- площадь листьев и корней – посредством программного обеспечения ImageJ и RhizoVision [8].

Для того чтобы измерить и проанализировать площадь листьев и корней, их отделяли от растений. На сканирующую поверхность располагали пробы, не допуская их взаимного перекрывания. Включали сканер и с использованием компьютерных программ определяли площадь листьев и корней (без учёта корневых волосков) в квадратных сантиметрах.

Результаты эксперимента

По окончании эксперимента ростки пшеницы изымались из ёмкостей, а целевые показатели снимались и анализировались. На рисунке представлены опытные образцы пшеницы. Видно, что преобладает вегетативная масса у пшеницы, обработанной штаммом AF3Эш и смесью всех штаммов, в то время как развитие корневой системы лучше выражено у контрольных образцов и растений, обработанных инокулятом AF3Эш.

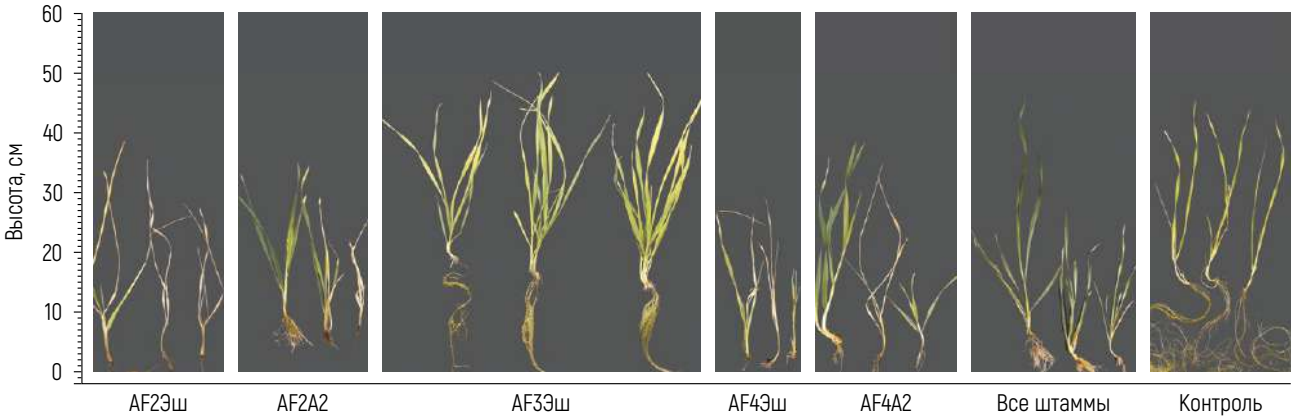


Рисунок – Образцы пшеницы: обработанные инокулятами и контроль

Применение бактериальных штаммов приводит к усилению вегетативного роста пшеницы за счёт комплексного воздействия на физиологические процессы. Происходит активация азотного метаболизма, поскольку азотфиксирующие бактерии увеличивают доступность молекулярного азота для растений, что способствует активному развитию вегетативных органов – стеблей, листьев. В результате накапливается больше биомассы в наземной части. Кроме того, бактерии продуцируют фитогормоны (ауксины, гиббереллины), стимулирующие деление клеток меристемы и рост побегов.

Общая поверхность корневых волосков и их длина у одного пшеничного растения очень велики (общая длина – до 10 км), благодаря чему корневая система задействует даже минимальное количество минеральных элементов, находящихся в среде. Развитая корневая система в контрольном варианте и при использовании штамма AF3Эш может быть обусловлена как внутренними физиологическими механизмами растения, так и дополнительной стимуляцией со стороны бактериальных инокулятов, которые усиливают выработку фитогормонов и улучшают минеральное питание, что приводит к повышению морфофизиологических характеристик.

В таблице представлены численные показатели роста исследуемых образцов пшеницы мягкой на 30-й день эксперимента.

Пшеница, обработанная инокулятом AF3Эш, имеет наибольшую среднюю высоту надземной части – 29,33 см, среднюю площадь листьев – 18,8 см^2 и сырую массу – 3,06 г. Максимальная средняя длина корневой системы зафиксирована в контрольном варианте – 38,33 см, при этом наибольшей средней площадью корневой системы обладают образцы, полученные с использованием штамма AF3Эш, – 27,98 см^2. Наименьшие средние ростовые показатели отмечены в опыте с применением штамма AF4Эш: высота растения – 14,33 см, длина корня – 1,83 см, площадь листьев – 0,76 см^2, площадь корневой системы – 0,26 см^2, сырая масса – 0,21 г. Таким образом, в результате добавления инокулята AF3Эш в питательную среду наблюдается увеличение (по сравнению с контролем) площади листовой пластины на 78 %, площади корневой системы на 41 %, а вегетативной массы на 60 %, что свидетельствует о повышении продуктивности растения и его сельскохозяйственной ценности при обработке бактериологическими штаммами в качестве биоудобрения.

Видимым стимулирующим ростовым действием обладают почвенные микроорганизмы штамма AF3Эш. Как следует из представленных данных, смесь всех штаммов не привела к сильному повышению каких-либо морфофизиологических характеристик пшеницы в ходе эксперимента, что может быть связано с антагонистической активностью выделенных бактерий при совместном культивировании.

Минимальные показатели продемонстрировали растения, обработанные штаммом AF4Эш. Вероятно, это обусловлено тем, что молодые проростки оказались крайне чувствительными к метаболитам, продуцируемым данными микроорганизмами.

Таблица – Влияние бактериологических инокулятов на морфофизиологические показатели пшеницы мягкой

Вариант эксперимента	Ростовые показатели, среднее значение				
	Высота надземной части, см	Длина корня, см	Площадь листьев, см^2	Площадь корней, см^2	Сырая масса растения, г
AF2Эш	19,33	5,67	1,96	0,49	0,3
AF2A2	14,67	2	6,15	1,58	0,64
AF3Эш	29,33	24,33	18,8	27,98	3,06
AF4Эш	14,33	1,83	0,76	0,26	0,21
AF4A2	15,33	3	3,4	0,54	0,46
Все штаммы	26,67	6,33	12,15	3,28	1,44
Контроль	27,33	38,33	10,56	19,78	1,91

Заключение

Исследование микробиома почв с дальнейшим выделением ризосферных микроорганизмов и выполнением оценки их полезных свойств является важным этапом в процессе создания эффективных биопрепаратов. Есть необходимость в расширении таких работ с увеличением времени проведения экспериментов, а также числа анализируемых видов растений. Следует охватить полный вегетационный период культуры для изучения урожайности и содержания питательных веществ в плодах и зерновках.

Полученные в ходе опытов данные позволяют оптимизировать ведение продуктивного земледелия с использованием биопрепаратов uTerra, понять механизмы симбиотического взаимодействия между растениями и агрономически ценными почвенными микроорганизмами.

Рассмотренные бактериологические штаммы обладают стимулирующими свойствами для пшеницы, положительно влияя на увеличение размеров побегов и биомассы, в частности за счёт связывания атмосферного азота и включения его в метаболизм растений. Наилучшие результаты продемонстрировал вариант AF3Эш. Следовательно, соединения бактериального происхождения на основе азотфиксирующих микроорганизмов, например штамма AF3Эш, могут применяться в условиях замкнутой экосистемы, в том числе в ЭКД, для стимуляции роста и развития культур, что согласуется с экологическим вектором безопасного и эффективного освоения ближнего космоса.

Список основных источников

1. *A Sustainable Study of Nutrient Management Using Different Combinations of Organic and Inorganic Fertilizers for Enhancing Wheat Productivity / W. Singh, V. Mor, M. Singh, P. Khyalia // Egyptian Journal of Botany. – 2025. – Vol. 65, iss. 1. – P. 232–240.*
2. *Юницкий, А.Э. Особенности проектирования жилого космического кластера «ЭкоКосмоДом» – миссия, цели, назначение / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 51–57.*
3. *Transcriptome and Metabolome Analysis of Organic and Chemical Fertilizer Effects on Highland Barley Growth and Nutrient Utilization / J. Yan, H. Weng, L. Hou [et al.] // Agronomy. – 2025. – Vol. 15, iss. 2. – 380.*
4. *The Effects of Different Fertilization Conditions on Bacterial Plant Growth Promoting Traits: Guidelines for Directed Bacterial Prospection and Testing / P.B. da Costa, A. Beneduzi, R. de Souza [et al.] // Plant Soil. – 2013. – Vol. 368. – P. 267–280.*
5. *Hussain, N. Nano-Fertilizers and Their Potential Application in Agriculture / N. Hussain, S. Sarma // Nanoparticles Synthesis by Soil Microbes: Application in Plant Production and the Environment / eds: A. Kumar [et al.]. – London, 2024. – Chap. 12. – P. 271–288.*
6. *Ahlawat, N. Use of Bioformulations and Bio-Control Agents in Agriculture: A Review / N. Ahlawat, K. Kumari // Plant Archives. – 2025. – Vol. 25, suppl. 1. – P. 1529–1538.*
7. *Юницкий, А.Э. Фиксация азота клубеньками гороха посевного (Pisum sativum L.) при помощи азотфиксирующих бактерий, выделенных из почв различных регионов / А.Э. Юницкий, И.А. Налетов, В.С. Заяц // Сахаровские чтения 2024 года: экологические проблемы XXI века: материалы 24-й междунар. науч. конф., Минск, 23–24 мая 2024 г.: в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, УО «Междунар. гос. эколог. ин-т им. А.Д. Сахарова» Белорус. гос. ун-та; редкол.: А.Н. Батян [и др.]; под общ. ред. О.И. Родькина, М.Г. Герменчук. – Минск, 2024. – Ч. 2. – С. 67–70.*
8. *RhizoVision Explorer: Open-Source Software for Root Image Analysis and Measurement Standardization / A. Seethepalli, K. Dhakal, M. Griffiths [et al.] // AoB Plants. – 2021. – Vol. 13, iss. 6. – plab056.*

УДК 662.66:631.417.2+629.7

Структура и биологическая активность гуминовых кислот: перспективы применения в ЭкоКосмоДоме

А.Э. Юницкий[1, 2]
доктор философии транспорта

Д.А. Конёк[2]

Н.С. Першай[2]
кандидат технических наук

В.С. Заяц[2]

Е.В. Шерешовец[2]

[1] ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

[2] ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

Проведено комплексное исследование физико-химических свойств и структурных особенностей гуминовых кислот (ГК), полученных из четырёх видов органического сырья – бурых углей Карагандинского и Южно-Уральского угольных бассейнов, а также низинного торфа и биогумуса uTerra, – для создания оптимального биоудобрения, которое будет использоваться при культивировании растений в ЭкоКосмоДоме.

Цель работы – изучить строение ГК и их биологическую активность в зависимости от исходного сырья и концентрации.

С применением методов химического анализа, ИК-спектроскопии и растровой электронной микроскопии исследована структура ГК с акцентом на поиск молекулярных фрагментов, ответственных за физиологическую и протекторную активность гуминовых веществ. Установлены особенности строения ГК различного происхождения.

Выявлено, что природа ГК (соотношение ароматических и алифатических фрагментов в структуре макромолекулы) оказывает прямое влияние на физиологическую активность растений при внесении данных соединений в почву в концентрации от 13 до 65 мг/л (в зависимости от происхождения). Представлены результаты анализа воздействия гуминовых препаратов из различного сырья на рост салата *Lactuca sativa* L., культивированного на универсальном почвогрунте Terra Vita (ООО «Норд Палп», Россия). Сделан вывод о том, что лучшей биологической активностью обладают ГК с более высокой степенью ароматичности и низким содержанием алифатических фрагментов.

Ключевые слова:
биогумус, биологическая активность, бурый уголь, гуминовые вещества, гуминовые кислоты, замкнутые экосистемы, ИК-спектры, почвогрунты, строение гуминовых кислот, торф, ЭкоКосмоДом (ЭКД).

UDC 662.66:631.417.2+629.7

Structure and Biological Activity of Humic Acids: Application Prospects in EcoCosmoHouse

A. Unitsky [1, 2]
Dr. of Philosophy
in Information Technologies
(Transport)

D. Konyok [2]

N. Pershai [2]
Ph.D. in Engineering Sciences

V. Zayats [2]

A. Sharashovets [2]

[1] Astroengineering Technologies LLC,
Minsk, Belarus

[2] Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

A comprehensive study was conducted on the physicochemical properties and structural features of humic acids (HA) obtained from four types of organic raw materials: brown coal from the Karaganda and South Ural coal basins, as well as lowland peat and uTerra biohumus, to create an optimal biofertilizer that will be used in plant cultivation in the EcoCosmoHouse.

The aim of the work is to study the structure of HA and their biological activity depending on the source material and concentration.

Using chemical analysis, IR spectroscopy, and scanning electron microscopy, the structure of HA was investigated with a focus on identifying the molecular fragments responsible for the physiological and protective activity of humic substances. The structural features of HA of various origins were also determined.

It was found that the nature of HA – specifically, the ratio of aromatic to aliphatic fragments in the macromolecular structure – has a direct effect on plant physiological activity when applied to soil at concentrations ranging from 13 to 65 mg/l, depending on their origin. The paper presents the results of analyzing the effects of humic preparations derived from various raw materials on the growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivated on Terra Vita universal potting soil (Nord Pulp LLC, Russia). It was concluded that HA with a higher degree of aromaticity and a lower content of aliphatic fragments exhibit greater biological activity.

Keywords:
biohumus,
biological activity,
brown coal,
closed ecosystems,
EcoCosmoHouse (ECH),
humic acids, humic substances,
IR spectra, peat, potting soil,
structure of humic acids.

Введение

Гуминовые вещества (ГВ) – сложные органические соединения, которые образуются при разложении растительных и животных остатков, – являются важной частью почвы и играют ключевую роль в её плодородии. На сегодняшний день исследования многих учёных – химиков, экологов и агрономов – направлены на создание устойчивых и продуктивных агроэкосистем путём применения ГВ для улучшения здоровья земель и повышения урожайности сельскохозяйственных культур в экстремальных климатических зонах, а также на околоземной орбите в ЭкоКосмоДоме (ЭКД) [1, 2]. Особое внимание уделяется лёгким почвогрунтам, которые, несмотря на свою низкую плотность и высокую проницаемость, могут быть продуктивными при правильном подходе. Ранее авторами [3, 4] для использования в ЭКД разработаны составы и способы производства таких почвогрунтов на основе керамзита и перлита.

Одно из важнейших условий, влияющих на плодородие почв, – наличие в их составе ГВ. Применение данных веществ эффективно при выращивании продукции в замкнутых экосистемах и имеет ряд экономических и экологических преимуществ:

- улучшение урожайности и качества продукции. ГВ могут способствовать увеличению урожайности растений за счёт повышения содержания витаминов, минералов и других полезных веществ, что в свою очередь приводит к росту экономической эффективности;
- снижение затрат на покупку минеральных удобрений. Использование ГВ в качестве питательной добавки позволит полностью или частично отказаться от минеральных удобрений, а значит, сократить затраты на культивирование растений, уменьшить воздействие на окружающую среду и при этом получать экологически чистые продукты питания [1];
- утилизация органических отходов. ГВ могут быть выделены из органических отходов (бытовые отходы и канализационные стоки как сырьё для создания компоста и биогумуса), что помогает снизить нагрузку на окружающую среду;
- образование устойчивых экосистем. Применение ГВ способствует формированию устойчивых экосистем, обеспечивая долгосрочную продуктивность и стабильность.

Гуминовые кислоты (ГК) – один из основных компонентов ГВ, растворимый в щелочах, но нерастворимый в кислотах. ГК обладают высокой биологической активностью и используются в сельском хозяйстве для улучшения структуры почвы, стимуляции роста культур и повышения их устойчивости к стрессам. Содержание ГК в ГВ сильно варьируется в зависимости от происхождения сырья и условий его образования. В почвах их доля составляет от 30 до 80 %, в торфе – до 90 %, в буром угле – от 40 до 80 % (от общей массы ГВ) [5].

По химическому строению ГК относят к высокомолекулярным ароматическим оксикарбоновым кислотам [6, 7]. Основой их структуры являются конденсированные системы, включающие алициклические соединения и ароматические кольца, боковые алифатические цепи различной степени разветвления, а также гидрофильные функциональные группы при ядре и в боковых цепях. В зависимости от стадии углефикации, петрографического состава и степени окисленности они имеют различия по элементному составу, степени конденсированности макромолекул, количеству функциональных групп, молекулярной массе, соотношению гидрофобных и гидрофильных фрагментов [8, 9].

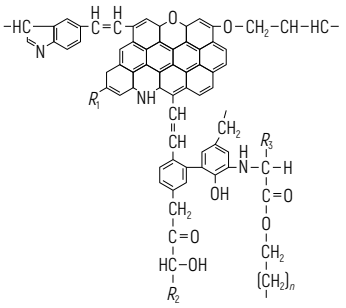
Брутто-формула ГК может быть записана следующим образом:

$$C_xH_yN_zO_pS_qM_r(Al_2O_3)_l(SiO_2)_m(H_2O)_n,$$

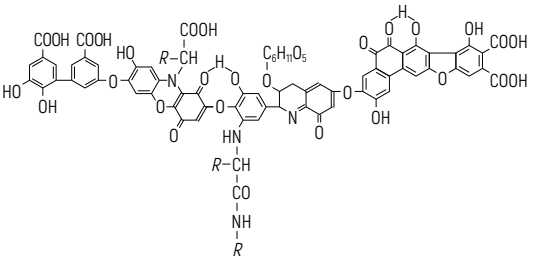
где M – ионы металлов;

x, y, z, p, q, r, l, m, n – стехиометрические коэффициенты.

Схемы строения вероятных фрагментов [5, 6], которые представляют собой минимальные по размеру части молекулы ГК и содержат все важнейшие структурные составляющие, приведены на рисунке 1 [7].



а)



б)

Рисунок 1 – Схематическое строение молекулы ГК:
а – гидролизуемая часть; б – негидролизуемая часть

Вопрос о молекулярных фрагментах, ответственных за физиологическую и протекторную активность молекул ГК, является наиболее актуальным для получения сбалансированных составов удобрений.

В связи с этим цель данной работы – исследование строения и биологической активности ГК в зависимости от их происхождения и концентрации. Это позволит проводить обоснованный отбор исходного сырья, прогнозировать биологическую активность ГВ и оптимизировать условия их извлечения для создания эффективных составов биоудобрений, которые повысят урожайность в ЭКД.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использованы ГК, выделенные из сырья различного происхождения: бурого угля Верхне-Сокурского (Карагандинский угольный бассейн, Россия) и Кумертауского (Южно-Уральский угольный бассейн, Россия) месторождений (далее – БУВ и БУК соответственно), низинного торфа (НТ) Гала-Ковальского месторождения (Беларусь) и биогумуса uTerra (БГ) (Беларусь). Биогумус uTerra представляет собой продукт биотехнологической переработки органических отходов животноводства и растениеводства при помощи ассоциаций почвенных микроорганизмов и специально выведенного земляного червя *Lumbricus uTerris*, способного употреблять в пищу бурый уголь.

Получение образцов ГК для дальнейших исследований осуществляли по стандартной методике путём щелочной экстракции исходного сырья. Блок-схема процесса показана на рисунке 2.

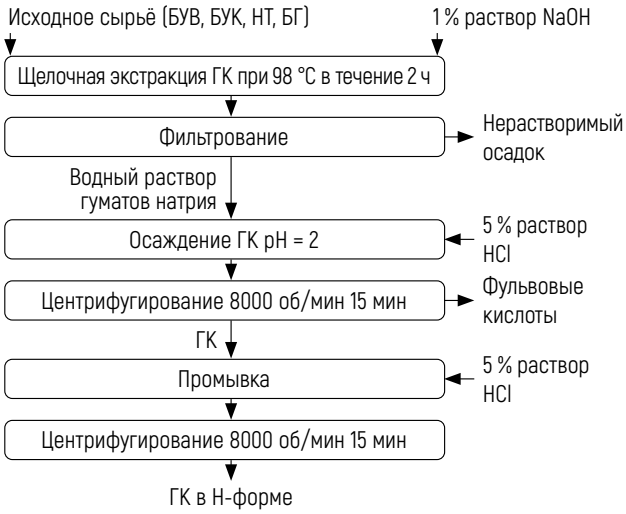


Рисунок 2 – Блок-схема процесса получения образцов ГК

Основные физико-химические характеристики исходного сырья и содержание в нём микро- и макроэлементов приведены в таблицах 1, 2.

Таблица 1 – Физико-химические характеристики исходного сырья

Исходное сырьё	Выход ГК, %	pH	A^d, %	Общий азот, %	Калий, мг/100 г	Фосфор, мг/100 г
БУВ	21,7	4,3	13,5	0,97	43,2	70,6
БУК	75,2	4,5	13,8	0,29	24,7	14,6
НТ	24	6,8	5,5	1,04	20,3	74,9
БГ	33,6	6,1	69,6	1,11	320,3	409,3

Таблица 2 – Содержание микро- и макроэлементов в исходном сырье

Элемент	Содержание, мг/кг			
	БУВ	БУК	НТ	БГ
Si	25 400	32 400	9570	58 954
Fe	48 800	9210	8250	5422
Ca	48 800	16 300	21 340	36 137
Al	22 100	21 100	632	5224
Na	457	326	784	133,6
Li	31	–	72	50,2
Mg	2370	1360	693	2731
Mn	522	28,7	69	219
Mo	476	17,2	2,7	1
Cr	98,1	21,9	–	7
Ti	2390	764	931	198,3
Zr	–	195	102	–
Zn	123	17,1	51	100,7
As	19,1	43,8	49,3	1,7
Cu	225	33,9	79,2	21,3
Pd	–	24,5	–	–
Ni	47,5	7,9	50,5	4,8

Примечание. Символ «–» означает, что элемент не был обнаружен прибором.

Выход ГК определялся по ГОСТ 9517-94 [10], зольность (A^d) – по ГОСТ ISO 1171-2012 [11], водородный показатель (pH) – по ГОСТ 11623-89 [12], массовая доля азота – методом Кьельдаля по ГОСТ 26715-85 [13], фосфора – по ГОСТ 26717-85 [14], содержание катионов K^+, Na^+ и Li^+ – методом пламенной фотометрии по ГОСТ 26718-85 [15] на аппарате BWB XP (BWB Technologies, Великобритания). Наличие остальных микроэлементов устанавливалось на рентгеновском спектрометре S8 TIGER (Bruker AXS, Германия) методом рентгенофлуоресцентного анализа и на атомно-эмиссионном спектрометре iCap 6300 Duo (Thermo Fisher Scientific, США).

Оценку функциональных групп в ГК осуществляли хемосорбционным методом в два этапа: на первом определяли суммарное содержание карбоксилов и фенольных гидроксилов баритовым методом, на втором – карбоксильных групп ацетатным методом [6, 16]. Количество фенольных гидроксилов рассчитывали по разности между результатами этих измерений.

ИК-спектры ГК регистрировали на спектрофотометре с преобразованием Фурье IR Prestige-21 (Shimadzu, Япония) в диапазоне волновых чисел от 4000 до 400 $см^{-1}$. Образцы ГК для исследования готовили по стандартной методике запрессовки с бромидом калия. Концентрация анализируемого вещества в таблетке составляла 0,3–0,7 %.

Поверхность микроструктуры ГК изучали с помощью сканирующего (растрового) электронного микроскопа JCM-6000 Plus (JEOL, Япония) при различном увеличении.

Элементный состав ГК определяли методом пиролиза на анализаторе Vario EL III (Elementar Analysensysteme, Германия). Масса навески находилась в диапазоне 0,2–0,5 г.

Для оценки биологической активности ГК проведён опыт по выращиванию салата листового (*Lactuca sativa* L.) сортов Бутерброд и Гранд (Агрофирма «АЭЛИТА», Россия) на почвогрунте Terra Vita (ООО «Норд Палп», Россия) со следующими характеристиками: гуматы – 20,8 %, азот общий – 0,68 %, нитраты – 2,28 г/кг, фосфор общий – 0,76 г/кг, фосфор подвижный – 0,4 г/кг, калий общий – 1,6 г/кг, калий подвижный – 1,33 г/кг, pH – 6,6, зольность – 6,6 %.

Время вегетации составляло 33–37 дней. Для выращивания использовались пластиковые ёмкости (10 л). Агротехника – общепринятая для салата листового. Температурный режим – 23–26 °C. Проводилось корневое внесение водных растворов ГК в виде гумата калия различной концентрации – трижды за время эксперимента (один раз в 10 дней).

Схема опыта:

- контроль положительный (K+) – полив водой (единоразово при первом поливе вносилось комплексное удобрение Kristalon Special (Yara, Нидерланды) – N : P : K = 18 : 18 : 18);
- контроль отрицательный (K–) – полив водой;
- водный раствор ГК в концентрации 65 мг/л;
- водный раствор ГК в концентрации 13 мг/л;
- водный раствор ГК в концентрации 1,3 мг/л.

Таким образом, в процессе экспериментов в почву вносились гуматы в объёме 1950, 390 и 39 мг/$м^2$. В ходе вегетации растений оценивалась высота их наземной части. Рассчитывался среднесуточный прирост, измерялись вегетативная масса и количество нитратов в конце испытаний. Фиксировалось физиологическое состояние культур, наличие заболеваний и вредителей.

Результаты исследования

Оценка состава и структуры гуминовых кислот

При оценке исходного сырья по выходу ГК, которые являются целевым продуктом при производстве гуминовых препаратов для улучшения качества почв и повышения плодородия, можно увидеть, что наиболее перспективен БУК (ГК – 75,2 %), но с минимальными значениями по азоту, калию и фосфору. БГ по сравнению с другим сырьём отличается максимальным содержанием этих важных для растений макроэлементов (таблица 1). Однако БГ характеризуется высокой зольностью (69,6 %) и низким уровнем выхода ГВ (33,6 %).

Исходные образцы кроме макроэлементов включают и такие необходимые микроэлементы, как кальций, алюминий, железо, магний, молибден, марганец и др. Их количество в зависимости от сырья существенно варьируется, что обусловлено объёмом воды, поступающей на стадии образования пласта или непосредственно в пласте природного материала.

Элементный состав ГК, выделенных из сырья различного происхождения, приведён в таблице 3.

Таблица 3 – Элементный состав и атомные отношения элементов в ГК

Исходное сырьё	A^d, %	Элементный состав, масс. % на сухую беззольную навеску						Атомное отношение
		C	H	N	S	O	H/C	O/C
БУВ	7	62,53	6,23	1,45	0,45	29,34	1,2	0,35
БУК	4,9	63,77	9,02	0,81	0,72	25,68	1,7	0,3
НТ	1	51,04	7,24	3,15	0,46	38,11	1,7	0,56

Как видно из результатов элементного анализа, содержание углерода больше в ГК бурого угля, что связано с увеличением доли этого элемента в процессе углефикации, сопровождающемся изменением процентной концентрации кислорода. Количество азота в ГК согласуется с данными, полученными для исходного сырья (таблица 1). Более высокое значение отношения Н/С в ГК БУК и НТ по сравнению с ГК БУВ свидетельствует о менее конденсированной структуре и преобладании алифатических фрагментов над ароматическими. Отношение О/С косвенно показывает степень окисленности, которая самая высокая у ГК НТ – в 1,7 раза больше, чем у ГК бурого угля.

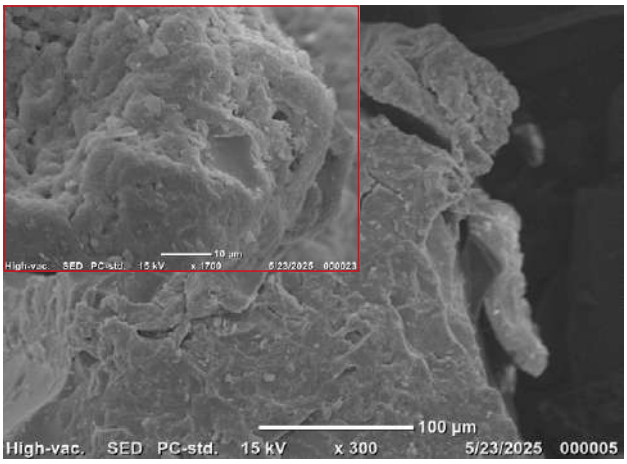
Информация о содержании функциональных групп в ГК приведена в таблице 4.

Таблица 4 – Содержание функциональных групп в ГК

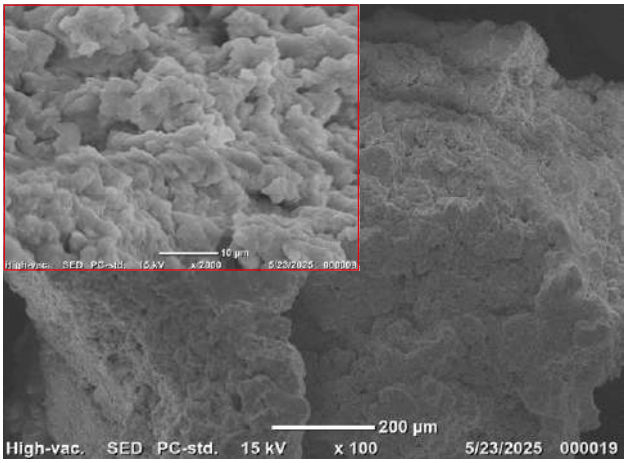
Исходное сырьё	Содержание функциональных групп, мг-экв/г		
	COOH	OH	COOH + OH
БУВ	2,84	5,29	8,13
БУК	2,5	3,25	5,75
НТ	3,5	4,14	7,64
БГ	3,26	2,21	5,47

Содержание карбоксильных COOH-групп в ГК бурого угля находится в одном диапазоне значений: 2,5–2,84 мг-экв/г, в то время как в ГК БГ и НТ этот показатель выше в 1,1–1,4 раза, что свидетельствует о лучшей способности вступать в ионный обмен с катионами металлов.

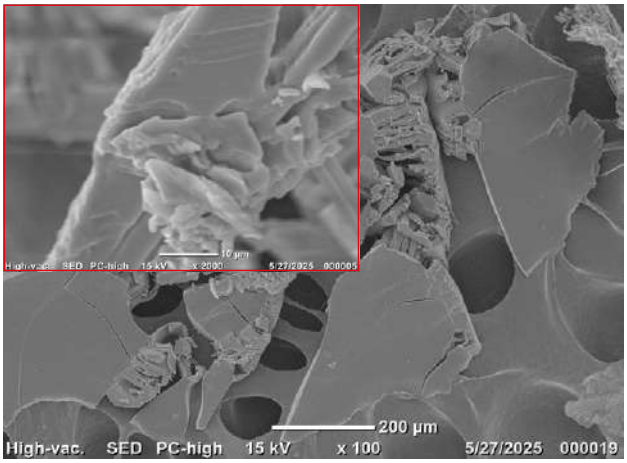
На рисунке 3 представлены фотографии образцов ГК БУВ и БГ. Частицы ГК квазикристаллической формы, т. е. упорядоченной, но непериодической структуры. Как видно, ГК обладают плоской поверхностью, не пронизанной капиллярами, без шероховатостей, которая в зависимости от исходного сырья отличается более или менее рыхлой структурой. У ГК во влажном состоянии отчётливо прослеживаются макропоры размером свыше 50 мкм, поверхность ровная, гладкая, в местах сколов наблюдается более развитая слоистая структура с многочисленными порами, капиллярами размером менее 50 мкм. Это говорит о следующем: удельная поверхность ГК во влажном состоянии больше, чем в сухом, что свидетельствует о потенциально различных механизмах адсорбциикатионов.



а)



б)



в)

Рисунок 3 – Микрофотографии образцов ГК различного происхождения:
а – БУВ сухой; б – БГ сухой; в – БУВ влажный

Интерпретация ИК-спектров ГК (рисунки 4, 5) проводилась согласно [17].

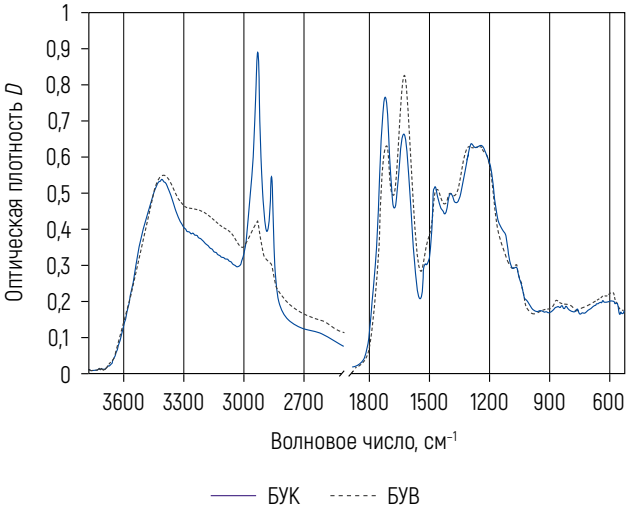


Рисунок 4 – ИК-спектры поглощения ГК бурого угля

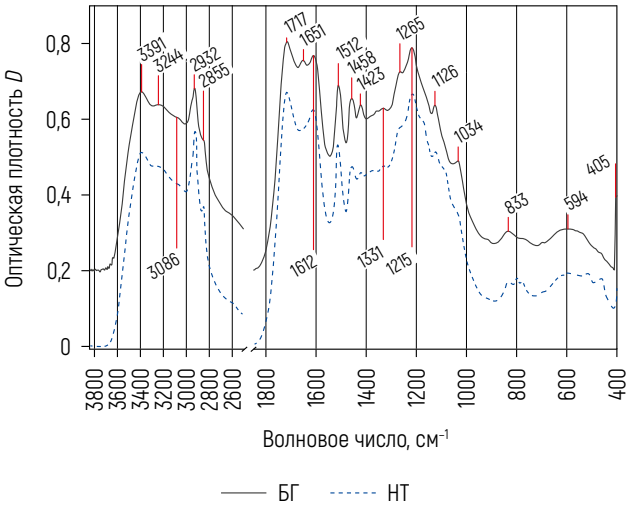


Рисунок 5 – ИК-спектры поглощения ГК БГ и НТ

Методом ИК-спектрального анализа установлены особенности молекулярного состава ГК, для которых характерны следующие частотные области поглощения: широкая полоса с максимумом поглощения ≈ 3419 см$^{-1}$ указывает на наличие гидроксильных групп, связанных водородной связью; полосы 2924 и 2852 см$^{-1}$ соответствуют валентным колебаниям CH_3- и CH_2-групп; 1630–1610 см$^{-1}$ – валентным колебаниям сопряжённых двойных связей C=C и ароматических фрагментов; 1370–1450 см$^{-1}$ – деформационным колебаниям связи C–H в алифатических CH_3- и CH_2-группах; 1280–1240 см$^{-1}$ – валентным колебаниям связи C–O карбоновых кислот, сложных эфиров, связи O–H фенолов; 1100–1030 см$^{-1}$ – связи C–O циклических и алифатических эфиров и спиртов; 800 см$^{-1}$ – связей C=C и C–H ароматических колец. Для всех ГК проявляются полосы различной интенсивности в области 1720–1710 см$^{-1}$ – валентные колебания связи C=O карбоновых кислот. В каждом образце ГК с разной степенью интенсивности наблюдаются полосы поглощения на 1090, 800, 780, 510 и 470 см$^{-1}$, обусловленные валентными колебаниями связей Si–C, Si–O.

Для всех ГК выполнены расчёты значений относительной интенсивности полос поглощения валентных колебаний связи C=O кислот и валентных колебаний сопряжённых углеродных двойных связей (1610 см$^{-1}$) по отношению к полосам валентных колебаний CH_2- и CH_3-групп (таблица 5).

Таблица 5 – Соотношение оптических полос ГК различного происхождения при определённых длинах волн

Исходное сырьё	Относительная интенсивность полос поглощения	
	$\frac{D_{1720}}{D_{2920,\,2850}}$	$\frac{D_{1610}}{D_{2920,\,2850}}$
БУВ	1,6	1,8
БУК	1,9	2,6
НТ	0,6	1
БГ	0,4	1

Как следует из таблицы 5, соотношение интенсивности полосы валентных колебаний сопряжённых углеродных двойных связей (1610 см$^{-1}$) и полос валентных колебаний CH_2- и CH_3-групп для ГК бурого угля по сравнению с ГК НТ и БГ выше в 1,8–2,6 раза, что свидетельствует об уменьшении алифатических фрагментов в структуре ГК бурого угля и образовании более конденсированных ароматических структур. При этом если между ГК БГ и НТ расхождений в значениях нет, то между ГК бурого угля двух месторождений различия в структуре макромолекул ярко выражены. Полученные данные ИК-спектроскопии согласуются и с результатами элементного анализа (таблица 3).

Сравнивая данные о соотношении количества алифатических и ароматических структур во фракциях ГК бурого угля, НТ и БГ, можно говорить о более однородной структуре у ГК НТ и БГ, т. е. соотношение содержания ароматических и алифатических фрагментов в этих образцах практически одинаково и не превышает 1, а в структуре ГК бурого угля ароматическая составляющая больше алифатической практически в два раза.

Оценка биологической активности гуминовых кислот

Влияние ГВ на физиологическую активность растений многообразно. Научно доказано, что благодаря этим веществам активизируется корнеобразование, за счёт изменения селективности клеточных мембран усиливается поступление воды и элементов питания [18–20]. Кроме того, гумусовые соединения положительно воздействуют на все фазы митотического цикла клеток и вызывают рост митотического индекса в 1,5 раза [21]. В [22] также показано, что применение ГВ приводит к увеличению энергии прорастания семян.

Результаты опыта по определению биологической активности ГК продемонстрировали, что внесение гуматов калия различного происхождения в специализированную почву стимулирует рост и урожайность салата листового.

Использование гуматов бурого угля ускоряет рост и повышает урожайность салата листового сорта Бутерброд. При тестировании физиологической активности установлено, что гуматы бурого угля вне зависимости от происхождения оказывают наиболее благоприятное воздействие в концентрации 65 мг/л (урожайность увеличилась на 11,4–12,8 % относительно отрицательного контроля), что отображено на рисунке 6. Эксперимент выявил неэффективность применения ГК в концентрации 1,3 мг/л, что было учтено при планировании дальнейших исследований.

Внесение гуматов калия БУК в концентрации 65 и 13 мг/л приводит к приросту урожайности на уровне показателя на чистом почвогрунте без внесения подкормок и демонстрирует, что структурно-групповой состав ГК оказывает влияние, особенно при малых концентрациях: урожайность ниже в 4,7 раза, величина габитуса растений – в 1,5 раза. Отсюда можно сделать вывод, что ГК с большей степенью ароматичности и меньшим количеством алифатических фрагментов обладают лучшей биологической активностью. Кроме того, ГК БУВ включают больше кислородсодержащих функциональных групп, азота и фосфора, которые необходимы растениям и благоприятно воздействуют на них.

Наличие нитратов в растениях служит индикатором доступности азота в почве в процессе роста культур. Согласно рисунку 7 данный показатель для салата листового (кроме опытов, в которых добавляли гуматы калия бурого угля в концентрации 13 мг/л, и положительного контроля) находится в рамках предельно допустимых концентраций (для салата защищённого грунта – 4500 мг/кг).

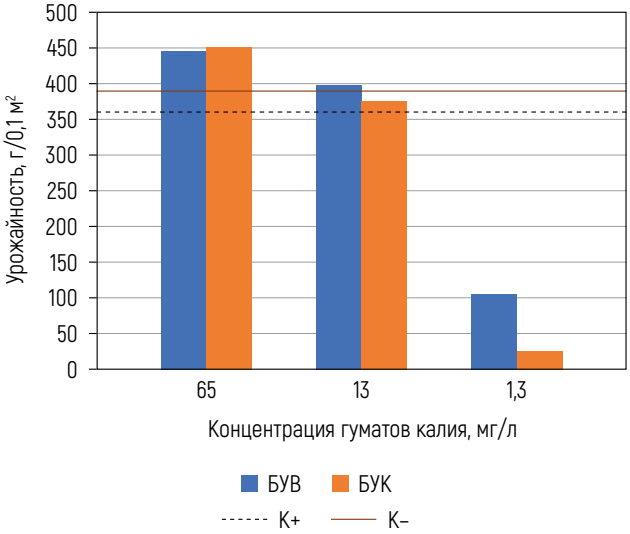


Рисунок 6 – Урожайность салата листового сорта Бутерброд при использовании гуматов калия бурого угля различного происхождения

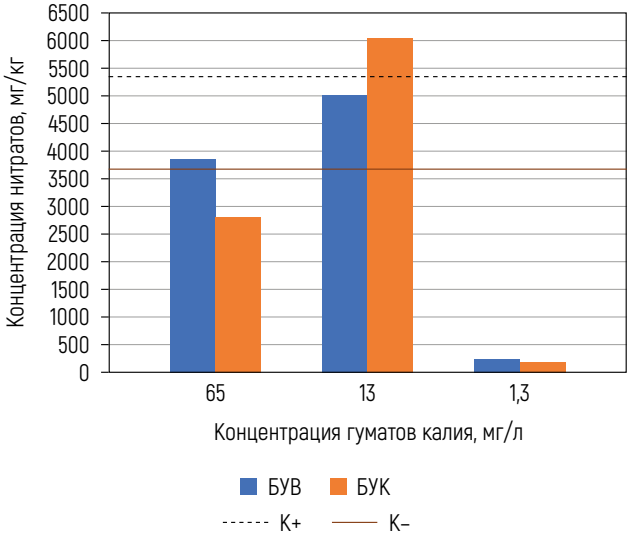


Рисунок 7 – Концентрация нитратов в салате листовом сорта Бутерброд при использовании гуматов калия бурого угля различного происхождения

Опыт показал, что растения в присутствии гуматов в концентрации 65 мг/л эффективно усваивают и используют нитратный азот, направляя его на процессы синтеза биополимеров, таких как белки и нуклеиновые кислоты, способствующих нормальному росту и развитию.

Предварительные результаты эксперимента продемонстрировали, что природа ГК (соотношение ароматических и алифатических фрагментов в структуре макромолекулы) оказывает прямое воздействие на их физиологическую активность при внесении в почву, особенно в небольших дозировках [23]. Влияние различий в структуре макромолекул ГК бурого угля на растения нивелируется при внесении ГК в почву в более высоких концентрациях. В дальнейших исследованиях для изучения природы исходного сырья использованы гуматы калия БУВ.

При последующем тестировании физиологической активности ГК различного происхождения (рисунок 8) выявлено, что гуматы, выделенные из БУВ и БГ, наиболее благоприятно воздействуют на прирост салата листового сорта Гранд при максимальной концентрации внесения (65 мг/л), что согласуется с данными, приведёнными в [20] и [21]. Однако в случае применения ГК, экстрагированных из НТ, в концентрации 65 мг/л наблюдалось угнетение роста (урожайность уменьшилась на 11,3 % по сравнению с салатом, выращенным без подкормки).

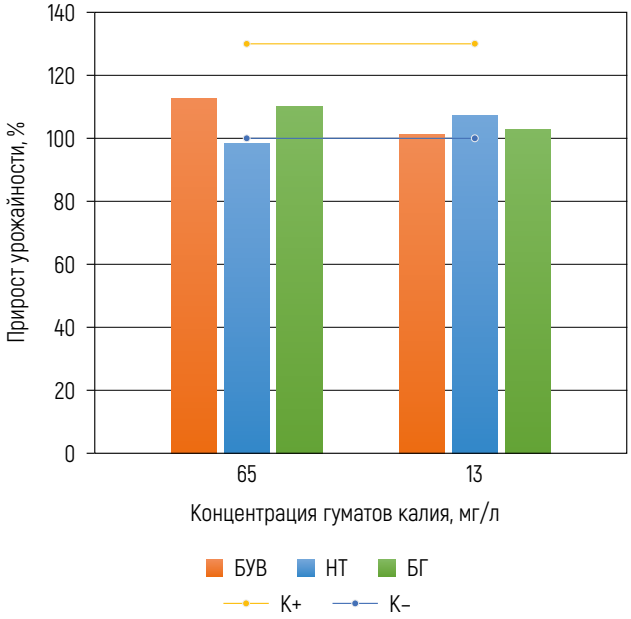


Рисунок 8 – Прирост урожайности салата листового сорта Гранд по отношению к контролю при использовании гуматов калия, выделенных из БУВ, НТ и БГ

Таким образом, внесение в почву более высоких концентраций ГК (65 и 13 мг/л) оказывает положительное воздействие на рост и урожайность салата листового сорта Гранд. Результаты опыта подтверждают уже ранее установленную тенденцию, когда большей урожайностью характеризуется применение ГК бурых углей с конденсированной структурой макромолекул [20, 23]. При концентрации 13 мг/л ГК НТ проявляют лучшую физиологическую активность по отношению к этому сорту растений. Определено, что снижение концентрации гуматов при внесении их в почву закономерно уменьшает урожайность салата листового на 6,8–11,3 % (за исключением торфяных гуматов, где урожайность, наоборот, увеличилась на 8,8 %).

Согласно данным рисунка 9 содержание нитратов для всех растений салата листового сорта Гранд находится в норме. Кроме того, следует отметить, что для указанного сорта не характерно излишнее накопление нитратов при концентрации гуматов калия 13 мг/л в отличие от сорта Бутерброд (рисунок 6).

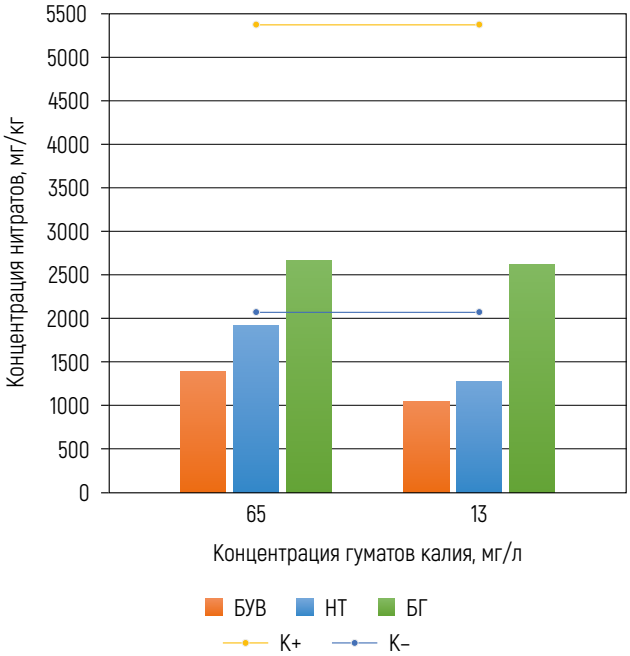


Рисунок 9 – Концентрация нитратов в салате листовом сорта Гранд при использовании гуматов калия, выделенных из БУВ, НТ и БГ

Количество нитратов не меняется при снижении концентрации гуматов калия, выделенных из БГ. Это свидетельствует о том, что, несмотря на высокое содержание азота, только его часть доступна для растений.

Таким образом, исходное сырьё и полученные из него ГК отличаются составом, структурно-групповыми свойствами и физиологической активностью. Эффективность использования гуматов различного происхождения зависит не только от природы исходного сырья, но и от сорта растений, для подкормки которых они применяются.

Учитывая физиологическую активность ГК и структурные особенности их макромолекул, можно сделать вывод, что наиболее перспективным сырьём для создания гуминовых препаратов для агроэкосистем ЭКД являются бурые угли. Именно ГК бурых углей обладают высокой степенью ароматичности, включают больше кислородсодержащих функциональных групп, а также азота и фосфора, что обеспечивает активное корнеобразование, стимуляцию митоза и эффективное усвоение нитратного азота растениями. Кроме того, при внесении гуматов бурого угля в концентрации 65 мг/л достигается оптимальное соотношение между урожайностью и безопасностью (отсутствие избыточного накопления нитратов).

Стоит подчеркнуть, что данные выводы сформулированы исключительно на основе анализа представленных образцов и полученных экспериментальных значений. Для окончательного выбора сырья необходимо проведение дополнительных исследований, учитывающих широкий спектр факторов, включая экономическую целесообразность. Такой подход позволит разработать наиболее эффективную и ресурсосберегающую стратегию земледелия.

Заключение

В ходе исследования изучена структура ГК и их биологическая активность в зависимости от типа исходного сырья. Проведённый анализ продемонстрировал, что состав и молекулярная структура оказывают прямое влияние на физиологическую активность ГК при внесении в почву в диапазоне концентраций от 13 до 65 мг/л.

Соотношение ароматических и алифатических фрагментов в макромолекулах ГК обуславливает физиологическую активность гуминовых препаратов при низких концентрациях. Однако при увеличении дозы ГК в растворе для полива эти различия в структуре макромолекул ГК перестают заметно воздействовать на растения.

Экспериментально показано, что применение ГВ не только способствует росту культур в закрытом грунте, повышает их урожайность, но также снижает содержание нитратов, улучшает структуру почвы и уменьшает потребность в минеральных удобрениях. Дополнительно подтверждена роль таких веществ в создании устойчивых экосистем, обеспечивающих долгосрочную продуктивность и экологическую безопасность.

Полученные данные позволяют целенаправленно корректировать состав гуминовых препаратов, прогнозировать их биологическую активность и адаптировать условия внесения с целью достижения максимального эффекта, что особенно важно для агроэкосистем при экстремальном климате и в космической среде. Все эти примеры ещё раз подчёркивают актуальность исследования механизмов воздействия ГВ на растения.

Список основных источников

1. *Piccolo, A. The Essential Role of Humified Organic Matter in Preserving Soil Health / A. Piccolo, M. Drosos // Chemical and Biological Technologies in Agriculture. – 2025. – Vol. 12. – 21.*
2. *Исследование биологической активности гуминовых веществ для создания препаратов против опустынивания / С.И. Жеребцов, Н.В. Малышенко, К.С. Вотолин [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. – 2019. – Т. 27, № 2. – С. 155–163.*
3. *Перспективные составы и способы производства лёгких почвогрунтов для ЭкоКосмоДома / А.Э. Юницкий, Н.С. Зыль, М.М. Парфенчик [и др.] // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы V междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 23–24 сент. 2022 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2023. – С. 250–260.*
4. *Технологические системы для культивирования растений в ЭкоКосмоДоме / А.Э. Юницкий, Н.С. Зыль, Д.А. Конёк, М.М. Парфенчик // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 336–347.*
5. *Попов, А.И. Гуминовые вещества: свойства, строение, образование / А.И. Попов; под ред. Е.И. Ермакова. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2004. – 248 с.*
6. *Орлов, Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации / Д.С. Орлов. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 324 с.*

7. *Stevenson, F.J. Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions / F.J. Stevenson. – 2nd ed. – New York: John Wiley & Sons, 1994. – 512 p.*
8. *Гуминовые вещества – гипотезы и реальность (обзор) / А.Г. Заварзина, Н.Н. Данченко, В.В. Демин [и др.] // Почвоведение. – 2021. – № 12. – С. 1449–1480.*
9. *Федотов, Г.Н. О природе гумусовых веществ / Г.Н. Федотов, С.А. Шоба // Почвоведение. – 2015. – № 12. – С. 1424–1432.*
10. *Топливо твёрдое. Методы определения выхода гуминовых кислот: ГОСТ 9517-94 (ИСО 5073-85). – Взамен ГОСТ 9517-76; введ. 01.01.1997. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – III, 9 с.*
11. *Топливо твёрдое минеральное. Определение зольности = Паліва цвёрдае мінеральнае. Вызначэнне зольнасці: ГОСТ ISO 1171-2012. – Взамен ГОСТ 11022-95 (ИСО 1171-97); введ. 01.09.2021. – Минск: БелГИСС, 2021. – IV, 6 с.*
12. *Торф и продукты его переработки для сельского хозяйства. Методы определения обменной и активной кислотности: ГОСТ 11623-89. – Взамен ГОСТ 11623-65; введ. 01.01.1991. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 8 с.*
13. *Удобрения органические. Методы определения общего азота: ГОСТ 26715-85. – Введ. 01.01.1987. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 16 с.*
14. *Удобрения органические. Метод определения общего фосфора: ГОСТ 26717-85. – Введ. 01.01.1987. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 12 с.*
15. *Удобрения органические. Метод определения общего калия: ГОСТ 26718-85. – Введ. 01.01.1987. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 8 с.*
16. *Орлов, Д.С. Практикум по химии гумуса: учеб. пособие / Д.С. Орлов, Л.А. Гришина. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. – 272 с.*
17. *Беллами, Л. Инфракрасные спектры сложных молекул / Л. Беллами; пер. с англ. В.М. Акимова [и др.]; под ред. Ю.А. Пентина. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – 590 с.*
18. *Molecular Characteristics of Humic Acids Isolated from Vermicomposts and Their Relationship to Bioactivity / D. Martinez-Balmori, R. Spaccini, N. Aguiar [et al.] // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2014. – Vol. 62, iss. 47. – P. 11412–11419.*
19. *Molecular Characteristics of Humic Substances from Different Origins and Their Effects on Growth and Metabolism of Pinus laricio callus / A. Muscolo, M. Sidari, V. Cozzolino [et al.] // Chemical and Biological Technologies in Agriculture. – 2022. – Vol. 9. – 72.*
20. *Структурно-групповой состав гуминовых кислот бурых углей и их физиологическая активность / С.И. Жеребцов, Н.В. Малышенко, О.В. Смотрина [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. – 2015. – Т. 23, № 4. – С. 439–444.*
21. *Степанов, А.А. Гуминовые почвомодификаторы из торфа и угля: влияние на химические и биологические свойства модельных почвосмесей / А.А. Степанов, О.С. Якименко // Агрохимия. – 2023. – № 5. – С. 53–59.*
22. *Зубкова, В.М. Продуктивность и химический состав ячменя при внесении извести, минеральных удобрений и гумата калия / В.М. Зубкова, Н.В. Зубков, Е.Г. Левкина // Зерновое хозяйство. – 2007. – № 5. – С. 12–13.*
23. *Особенности состава и биологической активности гуминовых кислот бурых углей Верхне-Сокурского и Кумертауского месторождений / А.Э. Юницкий, Д.А. Конёк, Н.С. Першай [и др.] // Сахаровские чтения – 2025: экологические проблемы XXI века: материалы 25-й междунар. науч. конф., Минск, 22–23 мая 2025 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. ун-т, Междунар. гос. эколог. ин-т им. А.Д. Сахарова Белорус. гос. ун-та; редкол.: А.Н. Батян (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2025. – Ч. 1. – С. 435–440.*

Os
Osmium
190.23
Ir
Iridium
192.217
Pt
Platinum
195.085
Au
Gold
196.967
Hg
Mercury
200.592
Tl
Thallium
204.383
Hs
Hassium
[269]
109
Mt
Meitnerium
[268]
110
Ds
Darmstadtium
111
Rg
112
Cn
113
Uut
62
Sm
Samarium
150.36
63
Eu
94
Pu
95
Bk

УДК 631.4+629.7

Применение uTerra и биоразлагаемых полимеров в устойчивом земледелии

А.Э. Юницкий[1,2]
доктор философии транспорта

С.А. Арнаут[2]
кандидат технических наук

А.А. Литвинчук[2]
кандидат технических наук

Н.С. Першай[2]
кандидат технических наук

[1] ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

[2] ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

Рассматриваются инновационные разработки ЗАО «Струнные технологии» (г. Минск, Беларусь), направленные на восстановление и поддержание плодородия почв, в том числе в засушливых регионах. Основное внимание уделено продукции линейки uTerra, обогащённой гуминовыми кислотами и агрономически ценными микроорганизмами, а также перспективам её совместного применения с биоразлагаемыми влагоудерживающими полимерами. Особое значение технологии uTerra и биоразлагаемых гидрогелей приобретают при создании устойчивых экосистем для экваториального линейного города (ЭЛГ) и орбитального ЭкоКосмоДома (ЭКД). При ограниченности природных ресурсов и необходимости поддержания высокоэффективных зелёных зон интеграция этих решений позволит обеспечить растения питательными веществами и влагой, способствуя формированию автономных и экологически сбалансированных агросистем.

Цель работы – обоснование и экспериментальная оценка эффективности применения продуктов линейки uTerra и биоразлагаемых полимерных влагоудерживающих материалов для повышения урожайности и устойчивости агросистем в условиях водного дефицита и деградации почв, а в дальнейшем – для интеграции в проекты ЭКД и ЭЛГ. Показано, что объединение данных технологий значительно улучшает влагоудерживающую способность почв и обеспечивает растения необходимыми питательными веществами. Обсуждаются экологические аспекты, устойчивость к засухам и потенциал внедрения предложенных решений в мировую агропромышленность и инфраструктуру будущих городов.

Ключевые слова:
биогумус uTerra, биоразлагаемый гидрогель, восстановление почв, устойчивое земледелие, ЭкоКосмоДом (ЭКД), эликсир плодородия uTerra.

UDC 631.4+629.7

Application of uTerra and Biodegradable Polymers in Sustainable Agriculture

A. Unitsky[1, 2]
Dr. of Philosophy
in Information Technologies
(Transport)

S. Arnaut[2]
Ph.D. in Engineering Sciences

A. Litvinchuk[2]
Ph.D. in Engineering Sciences

N. Pershai[2]
Ph.D. in Engineering Sciences

[1] Astroengineering Technologies LLC,
Minsk, Belarus

[2] Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

The article examines innovative developments of Unitsky String Technologies Inc. (Minsk, Belarus) aimed at restoring and maintaining soil fertility, including in arid regions. Primary attention is given to the uTerra products enriched with humic acids and agronomically valuable microorganisms, as well as to the prospects of their combined application with biodegradable moisture-retaining polymers. The technologies for uTerra and biodegradable hydrogels are of particular importance in the creation of sustainable ecosystems for the Equatorial Linear City (ELC) and the orbital EcoCosmoHouse (ECH). Under conditions of limited natural resources and the need to maintain highly efficient green areas, the integration of these solutions will ensure that plants receive essential nutrients and moisture, thereby contributing to the formation of autonomous and environmentally balanced agricultural systems.

The aim of this study is to substantiate and experimentally evaluate the effectiveness of applying uTerra products and biodegradable polymer-based moisture-retaining materials to increase crop yields and enhance the resilience of agricultural systems under conditions of water scarcity and soil degradation, with subsequent integration into ECH and ELC projects. It is shown that the combination of these technologies significantly improves soil moisture-retention capacity and provides plants with essential nutrients. Environmental aspects, drought resistance, and the potential for implementing the proposed solutions in the global agro-industrial sector and the next-generation urban infrastructure are discussed.

Keywords:
biodegradable hydrogel,
EcoCosmoHouse (ECH),
soil restoration,
sustainable agriculture,
uTerra biohumus,
uTerra fertility elixir.

Введение

Космическое индустриальное ожерелье «Орбита» (КИО «Орбита») представляет собой систему, которая позволяет вывести производство и индустриальные процессы на околоземную экваториальную орбиту, значительно уменьшая экологическую нагрузку на Землю. В структуру КИО «Орбита» входят ЭкоКосмоДома (ЭКД) – инновационные автономные экологически чистые жилища биосферного типа, интегрированные в природную среду и использующие передовые технологии для жизнеобеспечения. Данная концепция сочетает принципы устойчивого строительства, энергоэффективности и автономного сельского хозяйства, способствуя комфортному проживанию с минимальным воздействием на окружающий мир [1, 2]. КИО «Орбита» и ЭКД направлены на создание экологически безопасных решений для будущего, объединяя инновации и принципы разумного применения ресурсов.

Использование в ЭКД и экваториальном линейном городе (ЭЛГ) биоразлагаемых влагоудерживающих гидрогелей в сочетании с продуктами uTerra позволит:

- обеспечить эффективное озеленение при ограниченных водных ресурсах, формируя плодородные почвенные слои даже в неблагоприятных условиях;
- снизить потребление воды за счёт удержания влаги в корневой зоне растений, минимизируя испарение и потери на сток;
- создать автономные системы выращивания культур для обеспечения продовольственной независимости;
- предотвратить деградацию почв в урбанизированных зонах, способствуя улучшению экологического баланса.

Таким образом, применение этих технологий даст возможность сформировать самодостаточные экосистемы, объединяющие инновационные подходы в области сельского хозяйства, экологии и устойчивого развития.

В настоящее время в ЗАО «Струнные технологии» (г. Минск, Беларусь) активно проводятся изыскания по разработке и внедрению различных решений для поддержания и восстановления плодородия почв, в том числе в пустынных регионах Земли. Основными из таких решений являются биоудобрения uTerra, созданные в результате воздействия на питательное сырьё специально подобранных агрономически ценных аэробных и анаэробных штаммов почвенных микроорганизмов, собранных в мировом Банке почв uTerra, с целью получения продуктов, богатых микроорганизмами, гуминовыми кислотами и широким спектром макро- и микроэлементов.

Для достижения оптимального эффекта от вышеуказанных продуктов необходимо разрабатывать и непрерывно совершенствовать научно обоснованную технологию их применения для конкретных почвенно-климатических условий. Как доказали исследования А.Э. Юницкого, создателя инновационных агротехнологий, даже безжизненные пески пустыни могут превратиться в цветущий оазис, если обеспечить растениям достаточное питание и влагу. При этом ценным источником питательных веществ являются эликсир плодородия и биогумус uTerra, разработанные инженером А.Э. Юницким на основе уникальных биотехнологий с использованием земляного червя *Lumbricus uTerris*, употребляющего в пищу бурый уголь.

Проблему подачи влаги можно решать различными оросительными системами. Однако песок или песчаная почва не способны надолго задерживать влагу и питательные вещества в верхнем слое. Согласно концепции А.Э. Юницкого, со временем даже в такой почве за счёт органических остатков растений и агрономически ценных почвенных микроорганизмов, в том числе культур азотфиксирующих бактерий, происходит образование плодородного слоя. Ввиду этих особенностей самым трудоёмким и важным этапом становится начальный период освоения песчаных земель, когда необходимо обеспечить условия для удержания влаги и питательных веществ, способствующих формированию плодородного слоя.

В настоящее время в мире существует и создаётся множество технологий, ориентированных на решение этой проблемы. В соответствии с философией инженера А.Э. Юницкого разработки в данной области должны базироваться на использовании экологически чистых биоразлагаемых влагоудерживающих компонентов, которые безопасны для почв и не оказывают на них негативного воздействия. В связи с вышесказанным научные изыскания и инженерные проекты в этой сфере являются перспективным направлением деятельности компании.

Продукты линейки uTerra

В международной группе компаний Юницкого созданы агробиотехнологии, позволяющие преобразовать реликтовое ископаемое сырьё (бурый уголь, горючие сланцы, торф) в органическую и минеральную составляющие комплексного биоудобрения для растений.

Эликсир плодородия uTerra производится на основе микробиологического инокулята, содержащего свыше 3000 видов полезных микроорганизмов из мирового Банка

почв uTerra, расположенного на территории Крестьянского (фермерского) хозяйства «Юницкого» (г. Марьина Горка, Беларусь), с добавлением экстракта гуминовых кислот бурого угля.

Микроорганизмы, попадая в почву, высвобождают из имеющихся в ней химических связей большое количество макро- и микроэлементов. В свою очередь, гуминовые кислоты увеличивают проницаемость мембран корневой системы, затем высвобожденные вещества в необходимом количестве поступают в клетки растений. Это обеспечивает насыщенное питание культур. Кроме того, гуминовые кислоты ускоряют рост, укрепляют иммунитет и усиливают стрессоустойчивость растений.

Биогумус uTerra – вид рассыпчатого (твёрдого) удобрения, которое изготовлено из реликтового сырья и других компонентов, важных для биосферы, и обогащено ассоциациями агрономически ценных почвенных микроорганизмов. При получении биогумуса uTerra используется собственный вид червей *Lumbricus uTerris*.

Жидкий эликсир плодородия uTerra – комплексный продукт, который характеризуется высоким содержанием необходимых для роста и развития растений веществ, структурирующих почву компонентов, природных детоксикантов и агрономически ценных микроорганизмов. Он изготавливается по ТУ BY 192425076.017-2023 и применяется для высокоэффективного экологически безопасного возделывания сельскохозяйственных, цветочных культур, лекарственных растений, а также для создания, восстановления и поддержания почвенного плодородия, нарушенного естественными процессами или деятельностью человека. На живой природной почве, возрождённой при помощи данного удобрения, способна вырасти самая разнообразная качественная, полезная и даже целебная растительная пища.

Эффект от внесения эликсира плодородия uTerra:

- повышение урожайности и качества сельскохозяйственной продукции, ускорение роста и развития культур за счёт более оптимального снабжения необходимыми питательными веществами и натуральными фитогормонами;
- восстановление и поддержание почвенного плодородия, нарушенного естественными процессами или хозяйственной деятельностью человека, регулирование и нормализация pH почвы;
- защита растений от болезней и вредителей, стимулирование развития ассоциаций тысяч видов полезных почвенных микроорганизмов во всём их природном многообразии;
- снижение содержания тяжёлых металлов и радионуклидов за счёт их связывания в почве, уменьшение концентрации нитратов [3, 4].

Для повышения эффективности использования продуктов линейки uTerra в засушливых и пустынных регионах Земли целесообразно объединить вышеуказанные разработки с технологиями, улучшающими влагоудерживающую способность почв. В настоящее время для решения проблемы влагоудержания активное развитие получили гидрогели на основе различного рода синтетических и природных полимеров.

Актуальность применения биоразлагаемых влагоудерживающих полимеров в сельском хозяйстве

Современное сельское хозяйство сталкивается с комплексом вызовов, требующих инновационных решений. Биологически разлагаемые влагоудерживающие материалы на основе полимерных сетей представляют собой трёхмерные гидрофильные структуры, способные удерживать значительные объёмы воды – более 650 г на 1 г полимера [5]. Данные вещества также могут служить носителями для контролируемого высвобождения биологически активных соединений. Поскольку подобные материалы часто производятся из природных биополимеров, они обладают высокой биосовместимостью, экономической эффективностью и безопасностью, что делает их перспективными для различного применения. Ключевые причины их внедрения:

- дефицит водных ресурсов. Сельское хозяйство потребляет до 70 % мировой пресной воды, что усугубляет проблему её нехватки. Биоразлагаемые полимерные системы, способные абсорбировать и удерживать воду, повышают эффективность её использования за счёт снижения потерь на испарение и поверхностный сток, а также оптимизации распределения влаги в корневой зоне растений;
- адаптация к засухам. Возрастающая частота экстремальных засух, вызванных изменением климата, представляет серьёзную угрозу урожайности. Влагоудерживающие материалы помогают справиться с данной проблемой, создавая локальные запасы влаги, которые обеспечивают устойчивый водный режим для растений. Благодаря этому сельскохозяйственные культуры сохраняют физиологическую активность даже в засушливые периоды, поддерживая нормальное развитие и рост. Использование таких материалов содействует увеличению выживаемости растений в условиях дефицита воды, позволяя им адаптироваться к сложной климатической среде и повышая их шансы на успешное развитие, иногда на 20–40 %;

• восстановление деградированных почв. Эрозия, уплотнение и истощение земель негативно сказываются на их продуктивности, снижая урожайность и ухудшая условия для роста культур. Биоразлагаемые влагоудерживающие системы предотвращают эту проблему, стабилизируя структуру грунта и останавливая процессы эрозии, а также повышают пористость почвы, улучшая её аэрацию и инфильтрацию воды, что способствует равномерному распределению влаги в корневой зоне [6]. Такие системы уменьшают вымывание питательных веществ, сохраняя плодородие и обеспечивая растения микроэлементами, необходимыми для хорошего роста;

• устойчивое земледелие. Особый интерес к экологически чистым технологиям делает биоразлагаемые материалы важным элементом устойчивого сельского хозяйства. Их применение позволяет сократить расход удобрений на 30 % благодаря постепенному высвобождению питательных веществ. Кроме того, эти материалы содействуют минимизации загрязнения водоёмов агрохимикатами, предотвращая их неконтролируемый сток и накопление в экосистемах. Существенным преимуществом является также использование возобновляемого сырья, такого как крахмал, хитозан и альгинат, что обеспечивает экологическую безопасность и долгосрочную устойчивость сельскохозяйственных методов;

• продовольственная безопасность. К 2050 г. потребность в продовольствии вырастет на 60 %. Биоразлагаемые системы способствуют повышению урожайности за счёт оптимизации водного и питательного режимов, расширения сельхозугодий в засушливых регионах, улучшения устойчивости культур к климатическим стрессам;

• снижение экологического следа. Традиционные методы орошения и внесения удобрений часто становятся причиной серьёзных экологических проблем. Одной из них является эвтрофикация водоёмов, возникающая из-за неконтролируемого стока азота и фосфора, что приводит к избыточному росту водорослей и ухудшению качества воды. Кроме того, эти методы способствуют эмиссии парниковых газов, особенно закиси азота (N_2O), выбросы которой могут быть уменьшены на 25–50 % при эффективном удержании азота в почве [7]. Инновационные технологии помогают минимизировать подобные последствия, обеспечивая более устойчивые и экологически безопасные подходы к ведению сельского хозяйства.

Таким образом, биоразлагаемые материалы играют важную роль в экологически чистом агропроизводстве, предотвращая накопление микропластика в экосистемах и гарантируя их защиту от загрязнения. Благодаря своей биосовместимости они не оказывают негативного влияния на почвенную микробиоту [8]. Содержащиеся в таких материалах полисахариды, например хитозан, содействуют формированию устойчивости растений к патогенам и вирусам, укрепляя их иммунитет [9]. Контролируемое высвобождение удобрений, в частности азотных соединений, позволяет значительно снизить их потери (до 50 %) ввиду постепенного выделения аммония (NH_4^+) и нитратов (NO_3^-) в почву. Это способствует оптимальному питанию растений, увеличению урожайности за счёт повышенной доступности фосфора, калия и азота, а также уменьшает накопление фитотоксинов, обеспечивая лучшую выживаемость проростков [10].

Определённый интерес вызывают биоразлагаемые влагоудерживающие материалы на основе природного возобновляемого сырья – крахмала, хитозана, гуаровой камеди, желатина, лигнина и альгината. Изучение способов синтеза и факторов, влияющих на функциональные свойства этих полимеров, позволяет оптимизировать использование гидрогелей для решения задач устойчивого земледелия и адаптации к изменяющимся условиям.

Методы синтеза биоразлагаемых влагоудерживающих полимеров

Одним из наиболее изученных материалов, который благодаря своим уникальным свойствам широко применяется в качестве основы для создания влагоудерживающих биоразлагаемых полимеров, является крахмал. Это ключевой представитель класса углеводов, представляющий собой полисахарид с линейными (амилоза, α-1,4-гликозидные связи) и разветвлёнными (амилопектин, α-1,6-гликозидные связи) структурами. Его природные источники – картофель, злаки и зерновые культуры. Крахмал, отличающийся низкой стоимостью и безвредностью, активно исследуется как главный компонент биоразлагаемых влагоудерживающих материалов с трёхмерной сетчатой структурой, которые формируются путём химического сшивания или комбинации с другими полимерами, демонстрируя высокую влагоудерживающую способность и перспективность для сельскохозяйственного применения.

Методы синтеза и функциональные свойства крахмала:

• щелочной гидролиз: при взаимодействии крахмала маниока (*Manihot esculenta*) с полиакрилонитрилом в щелочных условиях образуется суперабсорбирующий материал, повышающий влагоёмкость почвы и стимулирующий развитие, например, проростков кукурузы (*Zea mays*) [11];

• прививочная полимеризация: введение 2-гидроксиэтилметакрилата и акриловой кислоты в структуру крахмала с использованием N,N'-метиленбисакриламида создаёт pH-чувствительные системы, пригодные для контролируемой доставки агрохимикатов [12];

• радиационно-индуцированная полимеризация: композиты крахмала и карбоксиметилцеллюлозы, синтезированные гамма-облучением, сохраняют абсорбционную способность даже в высокоионных средах [13];

• химическое сшивание: применение янтарного ангидрида для модификации картофельного и восковидного кукурузного крахмала обеспечивает стабильное влагопоглощение (до 260 г/г дистиллированной воды) и стимулирует ранний рост культур [14];

• создание нанокомпозитов: гамма-облучение наночастиц крахмала приводит к формированию структур с повышенной стабильностью, хотя их набухающая способность ниже аналогов;

• образование гибридных систем: прививка поливинилового спирта и наноцеллюлозы к крахмалу усиливает набухание (до 922 г/г дистиллированной воды) и pH-чувствительность, что критично для адаптивного управления ресурсами [15].

Крахмалсодержащие биоразлагаемые влагоудерживающие материалы благодаря вариативности методов синтеза (химическое сшивание, радиационная модификация, гибридизация с наноматериалами) демонстрируют высокий потенциал для устойчивого сельского хозяйства. Способность к адаптивному набуханию, контролируемому высвобождению питательных веществ и совместимость с экосистемами делают их ключевым инструментом в условиях дефицита водных ресурсов и климатических изменений.

Ввиду изложенного основная задача работы – обоснование и экспериментальная оценка эффективности применения биоразлагаемых полимерных влагоудерживающих материалов и продуктов линейки uTerra для повышения урожайности и устойчивости агросистем в условиях деградации почв и водного дефицита, а в дальнейшем – для интеграции в проекты ЭКД и ЭЛГ.

Материалы и методы исследований

В процессе работы проведена серия экспериментов, направленных на изучение сочетания продуктов линейки uTerra с гидрогелями, позволяющего добиться синергетического эффекта. В ходе исследований создавались различные почвенные составы, включающие песок, биогумус uTerra, гидрогель и эликсир плодородия uTerra, что дало возможность оценить их взаимодействие и влияние на удержание влаги и питательных веществ в почве.

В опытах использовался строительный песок фракции 0–3 мм (немытый), соответствующий требованиям ГОСТ 8736-2014, производства Республики Беларусь (Минская область). Плотность песка составляла 1,4–1,6 т/м^3, по содержанию питательных веществ он близок к пустынным почвам.

Биогумус uTerra – продукт переработки органических компонентов (органические остатки, бурый уголь, торф, компост, зола и производственные остатки эликсира плодородия uTerra) с участием почвенных микроорганизмов и земляного червя *Lumbricus uTerris*. Характеристики биогумуса: органическое вещество – 50 %, азот (общий) – 0,9 %, фосфор (общий) – 0,9 %, калий (общий) – 0,9 %, pH – 7.

При проведении поисковых экспериментов свойства биополимеров моделировали при помощи полиакрилата калия, как более изученного материала. Характеристики гидрогеля GELSAP-201 (полиакрилат калия): фракция – 0,1–0,5 мм, степень набухания – до 200 раз, плотность в сухом виде – 1,1–1,3 г/см^3, pH – 7, температурная устойчивость от –40 до 60 °C без потери влагоудерживающей способности, производитель – GELSAP (Китай).

Эликсир плодородия uTerra – жидкое комплексное органическое удобрение, разработанное для повышения урожайности сельскохозяйственных культур и улучшения качества почвы. В состав продукта входят следующие компоненты:

1) жидкая фракция биогумуса, содержащая полезные почвенные микроорганизмы из мирового Банка почв uTerra, включающего образцы плодородных земель, не тронутых плугом, из более чем 200 экологически чистых регионов пяти континентов планеты;

2) гуминовые и фульвовые кислоты из бурого угля, улучшающие структуру почвы и повышающие её плодородие за счёт стимуляции микробиологической активности;

3) комплекс макро-, микро- и ультрамикроэлементов, состоящий из азота, фосфора, калия, магния, кальция, железа, цинка и других биогенных веществ в легкоусвояемой форме;

4) органические стимуляторы роста:

• аминокислоты и витамины (C, группы B и др.), укрепляющие иммунитет растений;

• фитогормоны, регулирующие процессы роста и развития;

• янтарная и другие органические кислоты, улучшающие усвоение питательных веществ;

5) дополнительные компоненты:

• мёд и меласса как источники углеводов и биологически активных веществ для почвенной микрофлоры;

• элиситоры грибов, повышающие устойчивость растений к заболеваниям;

• натуральные минеральные компоненты из реликтового ископаемого сырья (более 80 химических элементов таблицы Менделеева).

Такой состав обеспечивает комплексное воздействие на почву и растения, включая повышение урожайности до 50 %, улучшение вкусовых качеств сельскохозяйственной продукции и защиту от болезней. Все компоненты подобраны с учётом принципов органического земледелия и являются экологически безопасными.

В процессе работы проведён ряд исследований:

1) определение скорости испарения влаги:

• анализ испарения влаги из песка с добавлением и без гидрогеля;

• подбор оптимальной концентрации гидрогеля.

К точно отмеренному количеству гидрогеля (0,05, 0,1, 0,5 и 1 г) в чашки Петри наливали 20 г воды, а после его набухания добавляли песок, доводя массу образцов до 100 г. В качестве контрольного варианта использовали образец, содержащий 80 г песка и 20 г воды. Все подготовленные образцы помещали в сушильный шкаф и подвергали сушке при 50 °С, осуществляя контрольное взвешивание каждые 30 мин. По завершении эксперимента выполняли окончательное высушивание до постоянной массы при 105 °С для определения содержания сухих веществ;

2) изучение динамики испарения влаги из почвы: анализ изменения скорости испарения влаги в различных почвенных составах при добавлении гидрогеля.

К отмеренному количеству гидрогеля (0,5 г) в чашки Петри наливали 20 г воды, а после его набухания добавляли биогумус (10, 20 и 30 г) и песок, доводя массу образцов до 100 г. Для контроля применяли образцы, содержащие 10, 20 и 30 г биогумуса без гидрогеля, 20 г воды и соответствующее количество песка для достижения общей массы 100 г, а также образец, состоящий из 80 г песка и 20 г воды. Все образцы помещали в сушильный шкаф и подвергали сушке при 40 °С, осуществляя контрольное взвешивание каждые 30 мин;

3) оценка влияния продуктов uTerra и гидрогеля на растения:

• исследование воздействия продуктов uTerra в сочетании с гидрогелем на рост и развитие культур;

• проведение стресс-теста для проверки устойчивости растений в условиях отсутствия полива.

Были подготовлены пять вариантов почвогрунта. Семена листового салата *Lactuca sativa* L. сорта Лола Бионда предварительно замачивали, проращивали и пикировали в горшочки по пять растений в каждый, проводя эксперимент в двух параллелях. Время вегетации составляло 30 дней. Салат выращивали в пластиковых стаканчиках объёмом 250 мл при температуре 23–26 °С. По завершении 20-дневного периода культивирования была имитирована засуха (стресс-тест) путём прекращения полива половины образцов на 10 суток, тогда как контрольные экземпляры продолжали получать влагу в обычном режиме.

В ходе исследований для оценки эффективности технологий и выявления закономерностей использовали экспериментальный, биологический и сравнительный методы, а также статистическую обработку данных.

Определение скорости испарения влаги из песка с добавлением и без гидрогеля; подбор концентрации гидрогеля

На основе полученных данных построены графики зависимости скорости испарения влаги из песка от количества введённого гидрогеля, а также рассчитаны скорости изменения влагосодержания исследуемых образцов (рисунок 1).

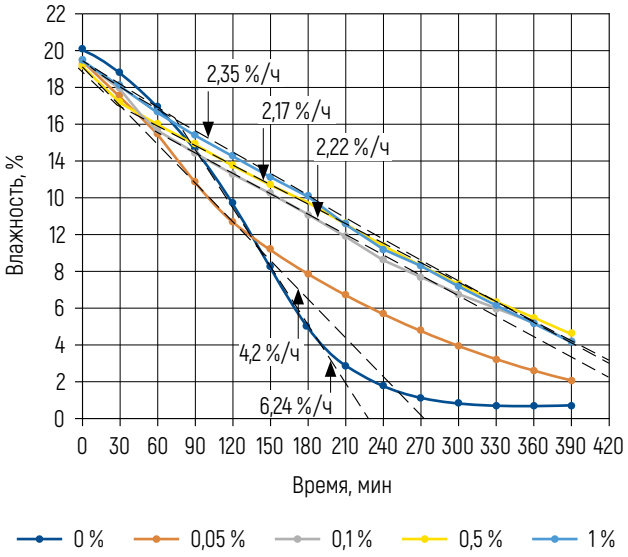


Рисунок 1 – Скорость испарения влаги из песка в зависимости от количества введённого гидрогеля

Анализ данных показывает, что использование гидрогеля в указанных концентрациях существенно снижает скорость влагоотдачи материала при высушивании. Так, добавление гидрогеля в количестве 0,1–1 % к почвенному субстрату уменьшило скорость влагоотдачи в 2,9 раза – с 6,24 до 2,17 %/ч (для наиболее эффективного образца).

Установлено, что при 20 % влажности почвенного субстрата минимальная оптимальная концентрация гидрогеля – 0,1 %, поскольку увеличение его содержания в 10 раз (с 0,1 до 1 %) не привело к значимым изменениям скорости влагоотдачи. В то же время при концентрации 0,05 % скорость влагоотдачи почти вдвое выше, чем при 0,1 % (4,2 против 2,22 %/ч).

С учётом полученных данных для дальнейших исследований выбрана концентрация гидрогеля 0,5 % в составе почвенного субстрата.

Рисунок 2 – Внешний вид почвенных составов после добавления воды:
1 – песок; 2 – песок + 30 % биогумуса uTerra;
3 – песок + 20 % биогумуса uTerra; 4 – песок + 10 % биогумуса uTerra;
5 – песок + 30 % биогумуса uTerra + 0,5 % гидрогеля;
6 – песок + 20 % биогумуса uTerra + 0,5 % гидрогеля;
7 – песок + 10 % биогумуса uTerra + 0,5 % гидрогеля

Изучение динамики испарения влаги из почвенных составов с добавлением и без гидрогеля

На рисунке 2 представлены образцы почвогрунта для исследования изменения скорости испарения влаги из специально подобранных почвенных составов. Визуальный осмотр после введения воды показал, что образец 1, содержащий только песок, не удерживает структуру, а его поверхность покрыта слоем воды. Почвогрунт 4 с 10 % биогумуса также обладает слабой структурой. Составы 2 и 3 (с 30 и 20 % биогумуса соответственно) демонстрируют более выраженную структурированность, но сохраняют кашеобразную консистенцию. Образцы 5–7, содержащие гидрогель, отличаются рыхлостью и пористостью.

После приготовления почвенных составов образцы подвергались контрольному высушиванию до постоянной массы, что позволило определить объём сухих веществ. На основе полученных данных построены графики зависимости скорости испарения влаги от состава почвенных образцов и рассчитаны скорости изменения влагосодержания образцов (рисунок 3).

Анализируя данные, приведённые на рисунке 3, можно сделать вывод, что использование гидрогеля в сочетании с биогумусом в указанных концентрациях приводит к снижению скорости влагоотдачи материала в 1,9–2,2 раза в процессе высушивания. При этом увеличение количества биогумуса сопровождается дополнительным уменьшением скорости влагоотдачи: при 10 % биогумуса – 1,94 %/ч, при 20 % – 1,71 %/ч, а при 30 % – 1,58 %/ч.

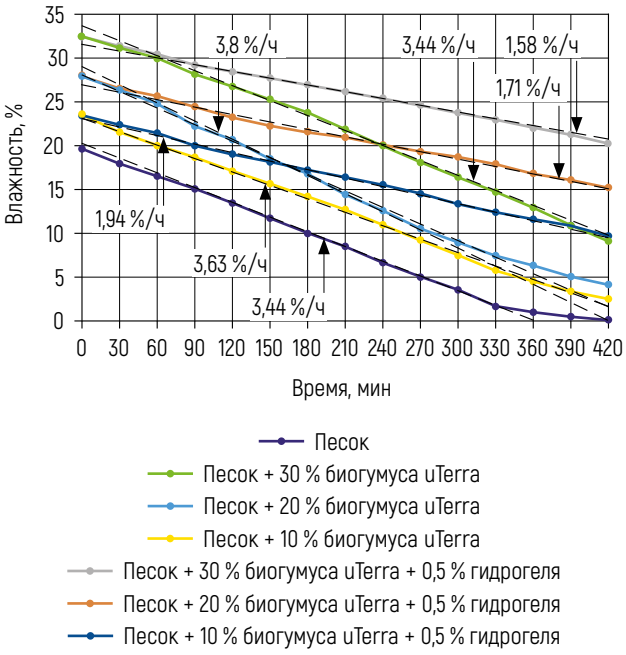


Рисунок 3 – Скорость испарения влаги
в зависимости от состава почвенных образцов

Эксперимент продемонстрировал, что скорость влагоотдачи контрольного образца песка без гидрогеля оказалась ниже по сравнению с песком, содержащим биогумус. Это можно объяснить следующим: образцы с биогумусом имели более развитую пористую структуру (рисунок 2), что увеличивало площадь поверхности испарения и, соответственно, скорость влагоотдачи.

Оценка влияния продуктов uTerra совместно с гидрогелем на рост и развитие растений

В ходе экспериментов изучена эффективность применения продуктов линейки uTerra в сочетании с гидрогелем для стимуляции роста и развития растений. Составы почвогрунтов, схемы полива и результаты визуальных наблюдений приведены в таблице. При 10-дневном дефиците влаги (рисунок 4, фото слева) после завершения основного вегетационного периода растения, обработанные продуктами uTerra и гидрогелем, демонстрировали выраженную устойчивость к стрессу по сравнению с контрольной группой, сохранившей регулярный полив (рисунок 4, фото справа). Это указывает на потенциал исследуемых компонентов в повышении адаптивности культур к засушливым условиям и формировании устойчивых агросистем.

Анализ данных таблицы показывает явное влияние состава почвогрунта и типа полива на урожайность и среднюю высоту растений.

Песок без добавок (образец № 1) продемонстрировал крайне низкую урожайность (2,8 г/м^2) и слабый рост салата (38 мм) при отсутствии полива. Однако при регулярном поливе с раствором uTerra (образец № 2) урожайность увеличилась до 129,3 г/м^2, а средняя высота – до 48 мм, что указывает на влияние почвенного эликсира.

Песок с 0,5 % гидрогеля (образец № 3) показал хорошую способность удерживать влагу, обеспечив урожайность 109,2 г/м^2 даже при отсутствии полива. Регулярный полив (образец № 4) привёл к росту урожайности до 250,3 г/м^2 при увеличении средней высоты растений до 42 мм.

Песок с 30 % биогумуса (образец № 5) усовершенствовал влагоудерживающие свойства почвы, продемонстрировав без полива урожайность 117 г/м^2. С регулярным поливом (образец № 6) урожайность возросла до 298,8 г/м^2, а средняя высота – до 46 мм.

Комбинация биогумуса и 0,5 % гидрогеля (образец № 7) показала ещё лучшие результаты удержания влаги, обеспечив урожайность 219,6 г/м^2 при отсутствии полива. Регулярный полив (образец № 8) позволил достичь урожайности 436,7 г/м^2, а средняя высота растений увеличилась до 58 мм.

Вариант почвогрунта, содержащий биогумус и 0,5 % гидрогеля, а также раствор uTerra (образец № 9), продемонстрировал максимальную урожайность 290,1 г/м^2 при отсутствии полива. При регулярном поливе (образец № 10) урожайность достигла 817,7 г/м^2, а высота растений – 71 мм, что является самым успешным результатом эксперимента.

Применение гидрогеля в сочетании с биогумусом повысило эффективность влагоудержания, что привело к увеличению урожайности в стресс-тесте на 98,9 % (образцы № 7 и 8). Дополнительное внесение 2 % раствора почвенного эликсира uTerra дало прирост урожайности на 87,2 % (образцы № 8 и 10), при этом стресс-тест показал, что комплексное использование гидрогеля, биогумуса и эликсира позволило поднять урожайность на 173,7 % (образцы № 6 и 10).

Таблица – Условия проведения и результаты эксперимента

Образец	Условия			Результаты	
	Почвогрунт	Полив	Стресс-тест	Урожайность*, г/м^2	Средняя высота растений, мм
№ 1	Песок	Вода + 2 % эликсира uTerra	Без полива	2,8	38
№ 2			–	129,3	48
№ 3	Песок + 0,5 % гидрогеля	Вода + 2 % эликсира uTerra	Без полива	109,2	32
№ 4			–	250,3	42
№ 5	Песок + 30 % биогумуса uTerra	Вода	Без полива	117	36
№ 6			–	298,8	46
№ 7	Песок + 30 % биогумуса uTerra + + 0,5 % гидрогеля	Вода	Без полива	219,6	36
№ 8			–	436,7	58
№ 9	Песок + 30 % биогумуса uTerra + + 0,5 % гидрогеля	Вода + 2 % эликсира uTerra	Без полива	290,1	39
№ 10			–	817,7	71

* Показатели урожайности определены на 30-й день роста, при этом сбор урожая данного салата необходимо осуществлять на 50–55-й день.

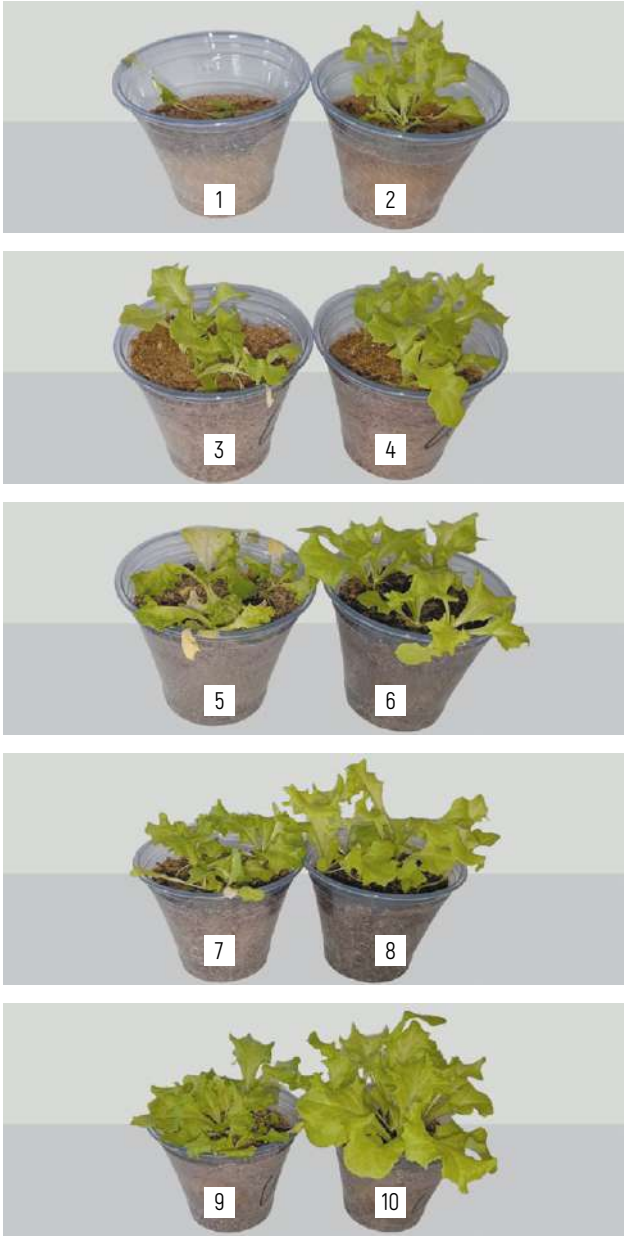


Рисунок 4 – Фотофиксация образцов салата листового на 30-й день вегетации

Таким образом, добавление биогумуса и гидрогеля способствует значительному увеличению урожайности и устойчивости растений к засухе. Почвенный эликсир uTerra повышает урожайность и рост культур даже в условиях песчаных субстратов. Сочетание гидрогеля (0,5 %), биогумуса и раствора uTerra при регулярном поливе даёт максимальные результаты по данным показателям при культивировании на песке.

Перспективы дальнейших исследований совместного применения гидрогелей и продуктов uTerra

В ходе проведённых экспериментов получены важные результаты, подтверждающие эффективность использования гидрогелей в сочетании с биогумусом и эликсиром плодородия uTerra. Анализ данных показал значительное улучшение влагоудерживающих свойств субстратов, повышение урожайности и устойчивости растений к стрессовым условиям.

Разработка экологичных биополимеров на основе тщательно отобранного сырья и их синергетическое применение с продуктами линейки uTerra представляет собой перспективное решение для оптимизации сельского хозяйства в засушливых регионах. Подобная интеграция передовых материалов с биологическими агротехнологиями создаёт устойчивую систему земледелия, базирующуюся на принципах экологической безопасности и ресурсосбережения. Ниже представлены два возможных направления исследований по использованию биополимерных гидрогелей.

Гидрогели с биологически активными наполнителями

Проблема низкой результативности использования удобрений может быть решена за счёт создания новой технологии их контролируемого высвобождения, что позволит повысить эффективность потребления азота, фосфора, калия и других элементов растениями и снизить загрязнение окружающей среды. В этом случае удобрения инкапсулируются в оболочки из полимерных материалов и высвобождаются при их постепенном разрушении. Нитрат аммония, фосфат аммония, хлорид калия, включённые в гидрогелевую матрицу, доступны для растений в течение гораздо более длительного времени, чем при непосредственном внесении минеральных веществ в почву [16].

Существует два метода обогащения гидрогеля питательными веществами: во время синтеза сетчатого сополимера и после получения гидрогеля [17].

Удобрения, сочетающие влагоудерживающую способность, пролонгированное высвобождение и безопасность для бактерий ризосферы, были разработаны на основе гидрогелей полиакрилонитрила и акриловой кислоты. Гранулы мочевины покрывали олеиновой кислотой, соевым и льняным маслом, а внешней оболочкой служил акрилонитрил, полимеризованный отдельно или в сочетании с акриловой кислотой [18].

Гидрогели как носители бактериальных препаратов (биоудобрений)

Использование биоудобрений представляется альтернативной практикой, которая способствует ведению устойчивого сельского хозяйства и восстановлению деградировавших почв. Биоудобрения, основанные на живых микроорганизмах, вносят в семена или почву для последующей колонизации ими ризосферы. Для иммобилизации бактерий, стимулирующих рост культур, требуются инертные носители, которые будут защищать микроорганизмы от неблагоприятных воздействий окружающей среды, обеспечивать их постепенное высвобождение и возможность длительного хранения такого препарата без потери жизнеспособности иммобилизованных бактерий.

Наиболее распространённым методом изоляции микроорганизмов от окружающей среды служит их инкапсуляция путём покрытия полупроницаемым полимером, через который в определённых условиях происходит их высвобождение.

С учётом вышесказанного одно из перспективных направлений исследования – получение на основе эликсира uTerra порошка, содержащего различные питательные вещества и микроорганизмы в состоянии анабиоза, и их гранулирование и инкапсулирование в биоразлагаемый влагоудерживающий полимер. За счёт варьирования различных свойств полимера можно изготовить гранулы, высвобождающие содержимое с разной скоростью, что обеспечит постепенное поступление питательных веществ в почву. Данное свойство комплексных продуктов будет особенно востребовано в условиях бедных песчаных почв и при освоении пустынных земель, поскольку способствует более бережному потреблению питательных веществ и уменьшает частоту их внесения.

Заключение

В условиях глобального изменения климата и деградации почв требуется внедрение инновационных технологий, повышающих устойчивость сельского хозяйства и обеспечивающих стабильное производство продовольствия. Это также имеет особую значимость для реализации концепции строительства ЭКД и ЭЛГ, где необходимы эффективные агротехнологии, интегрированные в устойчивые экосистемы с минимальным потреблением воды и ресурсов. Использование гидрогелей и биопрепаратов uTerra может стать ключевым элементом таких систем, способствуя созданию экологически чистых и продуктивных агросред.

Результаты исследований подтвердили, что добавление гидрогеля и биогумуса uTerra в почву существенно улучшает её влагоудерживающие свойства, снижает скорость испарения влаги и минимизирует потери питательных веществ. Применение гидрогеля в сочетании с биогумусом повысило эффективность влагоудержания, что привело к увеличению урожайности в стресс-тесте на 98,9 %. Дополнительное внесение 2 % раствора почвенного эликсира uTerra дало прирост урожайности на 87,2 %, при этом стресс-тест показал, что комплексное использование гидрогеля, биогумуса и эликсира uTerra подняло урожайность на 173,7 %.

Разработка экологичных биополимеров на основе тщательно отобранного сырья и их синергетическое применение с продуктами линейки uTerra представляет собой перспективное направление для повышения эффективности сельского хозяйства в засушливых регионах. Такая интеграция передовых материалов с биологическими агротехнологиями создаёт устойчивую систему земледелия, базирующуюся на принципах экологической безопасности и ресурсосбережения.

Дальнейшее развитие этих технологий позволит сформировать экологически устойчивые агросистемы, которые могут быть успешно интегрированы в концепции ЭКД и ЭЛГ, обеспечив максимальную продуктивность при минимальном воздействии на окружающую среду.

Список основных источников

1. *Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А.Э. Юницкий. – Силакрогс: ПНБ принт, 2019. – 576 с.*
2. *Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы III междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 12 сент. 2020 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск: СтройМедиаПроект, 2021. – 516 с.*
3. *Разработка состава почвогрунта для замкнутой экосистемы в космическом пространстве / А.Э. Юницкий, А.А. Костеневич, М.М. Парфенчик, Е.Г. Бойко // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы III междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 12 сент. 2020 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2021. – С. 412–423.*
4. *Юницкий, А.Э. Почва и почвенные микроорганизмы в биосфере ЭкоКосмоДома / А.Э. Юницкий, Е.А. Соловьёва,*

Н.С. Зыль // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 179–183.

5. *Bora, A. Starch and Itaconic Acid-Based Superabsorbent Hydrogels for Agricultural Application / A. Bora, N. Karak // European Polymer Journal. – 2022. – Vol. 176. – 111430.*
6. *Buchmann, C. Intrinsic and Model Polymer Hydrogel-Induced Soil Structural Stability of a Silty Sand Soil as Affected by Soil Moisture Dynamics / C. Buchmann, J. Bentz, G.E. Schaumann // Soil and Tillage Research. – 2015. – Vol. 154. – P. 22–33.*
7. *Global Warming Potential and Greenhouse Gas Emission Under Different Soil Nutrient Management Practices in Soybean–Wheat System of Central India / S. Lenka, N.K. Lenka, A.B. Singh [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. – 2017. – Vol. 24. – P. 4603–4612.*
8. *Chen, Y.-C. Thermo and pH-Responsive Methylcellulose and Hydroxypropyl Methylcellulose Hydrogels Containing K_2SO_4 for Water Retention and a Controlled-Release Water-Soluble Fertilizer / Y.-C. Chen, Y.-H. Chen // Science of the Total Environment. – 2019. – Vol. 655. – P. 958–967.*
9. *Katiyar, D. Chitosan as a Promising Natural Compound to Enhance Potential Physiological Responses in Plant: A Review / D. Katiyar, A. Hemantaranjan, B. Singh // Indian Journal of Plant Physiology. – 2015. – Vol. 20. – P. 1–9.*
10. *Dual-Functional Lignin-Based Hydrogels for Sustained Release of Agrochemicals and Heavy Metal Ion Complexation / L. Zheng, F. Seidi, W. Wu [et al.] // International Journal of Biological Macromolecules. – 2023. – Vol. 235. – 123701.*
11. *Ekebafe, L. Effect of Native Cassava Starch-Poly (Sodium Acrylate-co-Acrylamide) Hydrogel on the Growth Performance of Maize (Zea may) Seedlings / L. Ekebafe, D. Ogbeifun, F. Okieimen // American Journal of Polymer Science. – 2011. – Vol. 1, iss. 1. – P. 6–11.*
12. *Soleimani, F. Synthesis of pH-Sensitive Hydrogel Based on Starch-Polyacrylate Superabsorbent / F. Soleimani, M. Sadeghi // Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology. – 2012. – Vol. 3, No. 2A. – P. 310–314.*
13. *Synthesis of Carboxymethylcellulose/Starch Superabsorbent Hydrogels by Gamma-Irradiation / T. Fekete, J. Borsa, E. Takács, L. Wojnárovits // Chemistry Central Journal. – 2017. – Vol. 11, iss. 1. – 46.*
14. *Pathak, V. Effect of Starch-Based Hydrogel on Early Growth of Corn / V. Pathak // Purdue University. – URL: https://docs.lib.purdue.edu/dissertations/AAI10808135/ (date of access: 23.05.2025).*
15. *Olad, A. Fabrication and Characterization of a Starch-Based Superabsorbent Hydrogel Composite Reinforced with Cellulose Nanocrystals from Potato Peel Waste / A. Olad, F. Doustdar, H. Gharekhani // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2020. – Vol. 601. – 124962.*
16. *Ni, B. Multifunctional Slow-Release Urea Fertilizer from Ethylcellulose and Superabsorbent Coated Formulations / B. Ni, M. Liu, S. Lü // Chemical Engineering Journal. – 2009. – Vol. 155, iss. 3. – P. 892–898.*
17. *Multifunctional Porous Hydrogel with Nutrient Controlled-Release and Excellent Biodegradation / Z.-Y. Hu, G. Chen, S.-H. Yi [et al.] // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2021. – Vol. 9, iss. 5. – 106146.*
18. *Ghobashy, M.M. Radiation Synthesis of Urea/Hydrogel Core Shells Coated with Three Different Natural Oils via a Layer-by-Layer Approach: An Investigation of Their Slow Release and Effects on Plant Growth-Promoting Rhizobacteria / M.M. Ghobashy, I.M. Mousaa, G.S. El-Sayyad // Progress in Organic Coatings. – 2021. – Vol. 151. – 106022.*

УДК 619:612.084+629.7

Способ коррекции двигательных нарушений у лабораторных мышей при антиортостатической гипокинезии

Н.В. Жешко

И.В. Налетов

ЗАО «Струнные технологии»,
г. Минск, Беларусь

Описаны исследования, в ходе которых разработана комбинация сукцината кальция и триптофана для нормализации двигательной функции конечностей животных, изменённой вследствие антиортостатической гипокинезии. Опыты осуществлены на лабораторных мышах, определено влияние полученной добавки на локомоторную активность при гипокинезии, а также на общее состояние и прирост живой массы молодняка. Оба компонента препарата обладают синергетическим действием, стимулируя энергетический обмен в тканях организма и повышая стрессоустойчивость и продуктивность животных.

Применение добавки в дозе 200–400 мг на 1 кг живой массы позволяет уменьшить негативное влияние фактора гипокинезии на моторику, снизить потерю объёма мышц конечностей и живой массы, способствует скорейшему восстановлению прироста. В дозе 40–200 мг на 1 кг живой массы разработанная комбинация содействует стимуляции энергетического, минерального обмена и эритропоэза, что проявляется в увеличении прироста молодняка и улучшении общего состояния. Максимальный результат достигнут при дозе 200 мг на 1 кг живой массы.

Ключевые слова:
антиортостатическая гипокинезия, прирост живой массы, сукцинат кальция, триптофан, ЭкоКосмоДом (ЭКД).

UDC 619:612.084+629.7

Method for Correcting Movement Disorders in Laboratory Mice with Antiorthostatic Hypokinesia

N. Zheshka

I. Naletov

Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

The article presents research on a combination of calcium succinate and tryptophan developed to restore limb motor function in animals affected by antiorthostatic hypokinesia. The experiments were carried out on laboratory mice, and the effect of the supplement on locomotor activity in hypokinesia, as well as on the general condition and live weight gain of young animals, was determined. The two components demonstrated a synergistic effect, enhancing energy metabolism in body tissues and improving both the stress resistance and productivity of the animals.

Administration of these supplement at doses of 200–400 mg per 1 kg of live weight mitigates the negative effects of hypokinesia on motor function, reduces loss of limb muscle mass and live weight, and promotes faster recovery of growth. At 40–200 mg per 1 kg of live weight, the formulated combination enhances energy and mineral metabolism as well as erythropoiesis, resulting in accelerated growth of young animals and an overall improvement in their condition. The optimal effect is observed at a dose of 200 mg per 1 kg of live weight.

Keywords:
antiorthostatic hypokinesia,
calcium succinate,
EcoCosmoHouse (ECH),
live weight gain,
tryptophan.

Введение

Для обеспечения человека полноценным рационом в условиях ЭкоКосмоДома (ЭКД), а также при длительном проживании в космическом Ковчеге в межзвёздных путешествиях планируется выращивать и разводить продуктивных животных. Для их содержания будут использоваться передовые технологии и оборудование [1, 2]. Однако в замкнутом пространстве живые организмы могут подвергаться различным стрессовым нагрузкам, которые приводят к возникновению патологий. Один из таких факторов – ограничение двигательной активности (гиподинамия, гипокинезия).

Гиподинамия (уменьшение силы сокращения мышц) и гипокинезия (снижение двигательной активности) представляют интерес для изучения в медицине, ветеринарии и космической биологии [3, 4]. В современном обществе данные явления – результат минимизации доли физического труда и ограничения мышечных нагрузок, что можно отнести к издержкам научно-технического прогресса и рассматривать как своего рода конфликт между биологической сущностью человека и условиями жизни [4, 5]. Изучение гипокинезии имеет место и в клинической медицине: в случаях назначения длительного постельного режима, реабилитации после травм, переломов и др.

Гипокинезия и гиподинамия наблюдаются в промышленном животноводстве. Из-за скученного содержания, отсутствия моциона, периодической перегруппировки и транспортировки животные часто подвергаются гиподинамии. Это состояние истощает запас их резистентности, имеет неблагоприятный прогноз и плохо поддаётся регулированию [6].

В основе патофизиологических механизмов гипокинезии и гиподинамии лежат нарушения энергетического, газового и пластического обмена. Недостаточная двигательная активность животных приводит к комплексу адаптационных и морфофункциональных изменений в процессах тканевого и органного обмена: ослаблению интенсивности катаболизма и анаболизма, накоплению недоокисленных промежуточных и конечных продуктов обмена в крови и тканях, уменьшению числа микрокапилляров и уровня кровоснабжения органов, деминерализации костей, снижению аппетита и общей неспецифической резистентности организма, ухудшению воспроизводительной способности и, как следствие, продуктивности [7, 8]. Так, мясная продуктивность и биологическая ценность мяса свиней, подвергнутых гиподинамии, сокращаются на 5–13 %, особенно у стрессочувствительных животных [9]. По причине гиподинамии наблюдается до 57 % случаев яловости и бесплодия коров на молочно-товарной ферме, что приводит к преждевременной выбраковке данных особей. При этом продолжительность продуктивного использования коровы может снижаться на 17,2 %, а её пожизненный удой – на 20,9 % [10, 11].

Ограничение двигательной активности прежде всего влияет на скелетные мышцы: ослабляются импульсация, вызывающая движение и напряжение мышечных волокон, и обратный поток импульсов, которые информируют центральную нервную систему организма о происходящих в мышцах функциональных изменениях. Всё это приводит к нарушению структуры и функции сократительного аппарата мышц, а также нервно-мышечных контактов. Снижается тонус и уменьшается сила мышц, ограничивается объём движений в суставах, отмечается регресс двигательных навыков, ухудшается координация движений [4].

Основным методом коррекции гиподинамии и гипокинезии в ветеринарии является применение моциона, однако в условиях ограниченного пространства замкнутой экосистемы организация выгульных площадок имеет некоторые сложности. Для снижения негативного влияния гипокинезии на организм животных можно использовать массаж, фармакологические препараты (противовоспалительные, обезболивающие) и кормовые добавки, содержащие витамины, макро- и микроэлементы, аминокислоты, стимулирующие клеточный и тканевой обмен веществ. Исходя из этого, цель проводимых исследований – определение возможности применения комбинации сукцината кальция и триптофана для нормализации изменённых вследствие антиортостатической гипокинезии двигательных функций конечностей мышей.

Материалы и методы исследований

Для оценки влияния разработанной композиции на двигательную активность мышей в условиях гипокинезии, а также на общее состояние животных были осуществлены два эксперимента. В первом изучали возможность использования полученной добавки для коррекции двигательных нарушений, вызванных антиортостатической гипокинезией. Во втором проводили оценку воздействия препарата на прирост живой массы и общее состояние молодняка мышей.

В первом опыте с целью определения влияния различных доз комбинации сукцината кальция и триптофана на локомоторную активность лабораторных мышей было сформировано четыре группы животных двухмесячного возраста по пять особей в каждой (таблица 1).

Таблица 1 – Схема опыта по коррекции двигательных нарушений после антиортостатической гипокинезии

Группа	Количество мышей	Антиортостатическая гипокинезия	Комбинация сукцината кальция и триптофана, мг на 1 кг живой массы
Первая (опытная)	5	+	40
Вторая (опытная)	5	+	200
Третья (опытная)	5	+	400
Четвёртая (контрольная)	5	+	–

Животные всех групп подвергались антиортостатической гипокинезии (применяется для моделирования мышечной атрофии, остеопороза, состояния невесомости) посредством использования подвижного неинвазивного разгрузочного устройства (рисунок 1а), напечатанного на 3D-принтере QIDI I-Fast, которое поддерживает мышь под углом 30° дорсальной оси тела животного к поверхности дна клетки головой вниз (рисунок 1б) [12].

а)

б)

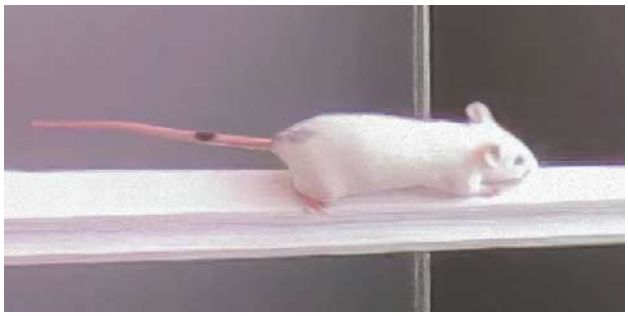
Рисунок 1 – 3D-печатное разгрузочное устройство:
а – общий вид; б – с зафиксированной мышью

Приспособления изготовлены с двумя вариантами диаметра колес (в зависимости от размера мыши). В этих устройствах грызуны находились на протяжении 14 суток. В корм животным добавлялась комбинация сукцината кальция и триптофана ежедневно в течение 23 дней (два дня до гипокинезии, 14 дней на протяжении разгрузки задних конечностей и семь дней после снятия устройств) в дозе: 40 мг на 1 кг живой массы в сутки для первой группы, 200 мг/кг – для второй и 400 мг/кг – для третьей. Животные четвёртой группы кормовую добавку не получали.

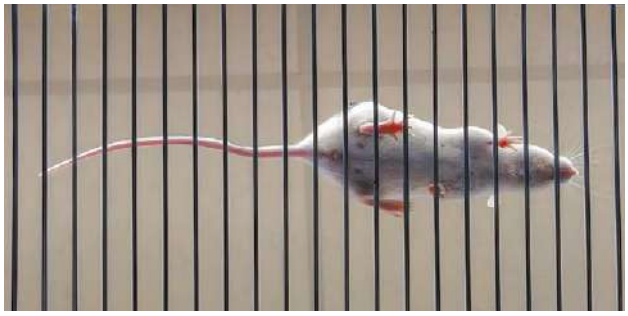
Все мыши были подвергнуты оценке двигательной активности до и после антиортостатической гипокинезии посредством тестов «Сужающаяся дорожка» и «Горизонтальная лестница». Еженедельно проводились замеры окружности голени задней правой конечности и взвешивание животных.

Замер окружности голени осуществлялся в середине диафиза правой большеберцовой кости. С помощью шовной нити получали три измерения, учитывалось среднее значение. Показатель использовался для оценки состояния мышц задних конечностей мышей на протяжении опыта.

Тест «Сужающаяся дорожка» (рисунок 2а) применялся для оценки функционирования передних и задних конечностей. Животное помещали на горизонтально расположенную сужающуюся перекладину, по которой оно должно было достичь «домика». Подсчитывались общее количество шагов (от стартовой линии до захода в тёмную камеру), число промахов (постановка конечности на нижний луч) и соскальзываний (кисть или стопа размещена на обоих лучах) правых передней и задней конечностей. Для этого теста проводили предварительное обучение животных, направленное на привыкание к экспериментальной установке, пока мыши не начинали успешно проходить по дорожке без поворотов назад и промахов [13–16].



а)



б)

Рисунок 2 – Экспериментальные установки:
а – сужающаяся дорожка; б – горизонтальная лестница

Тест «Горизонтальная лестница» (рисунок 2б) показывает более выраженные нарушения моторики и мышечной силы. Горизонтальная лестница состояла из параллельных перекладин, которые располагались на равном расстоянии друг от друга. До начала опыта проводили предварительное обучение мышей. В данном тесте оценивали показатели для правых передней и задней конечностей: время прохождения лестницы, общее количество шагов, число промахов (стопа или кисть вообще не коснулась перекладины), соскальзываний (стопа или кисть поставлена на перекладину, но соскользнула), количество правильных шагов (стопа или кисть поставлена на перекладину с полной поддержкой веса) [13, 14].

Во втором опыте для определения влияния разработанной комбинации на прирост живой массы и общее состояние молодняка использовали грызунов в возрасте четырёх недель. Ежедневно в течение месяца животные получали вместе с кормом препарат в следующих дозах: первая группа – 40 мг на 1 кг живой массы, вторая – 100 мг/кг, третья – 200 мг/кг. В четвёртой группе сохранялся обычный рацион. Мышей взвешивали один раз в неделю. В конце опыта у животных брали пробы мочи, которые исследовали с помощью тест-полосок «Мультитест». В осадке мочи посредством микроскопирования определяли наличие организованных (клетки крови, эпителий) и неорганизованных (кристаллы солей) компонентов. У части животных (по три особи из каждой группы) были отобраны пробы крови для оценки гематологических показателей (общий клинический анализ крови). На протяжении эксперимента осуществлялось наблюдение за поведением и общим состоянием мышей [17].

После завершения опытов проанализированы полученные данные и проведена их статистическая обработка с помощью программного пакета Microsoft Excel (статистически значимой считалась разница при $P < 0,05$).

Механизм действия комбинации сукцината кальция и триптофана на организм животных

Скелетная мускулатура, являющаяся наиболее распространённой тканью в организме млекопитающих, выполняет ряд важных физиологических функций (поддержание определённой позы, передвижение тела в пространстве, перемещение отдельных частей тела относительно друг друга, регуляция температуры). Мышечная масса определяется динамическим балансом между синтезом белка и его распадом [18]. При гипокинезии происходит изменение типа энергообмена в мышечных волокнах, что приводит к снижению скорости клеточного дыхания как терминальной стадии в цепи синтеза высокоэнергетических фосфатов (например, аденозинтрифосфорной кислоты – АТФ) [19]. Если создаётся дефицит энергетического потенциала в клетке, которая тратит субстрат для энергии в больших количествах, то способом протезирования энергетического дефицита при любом критическом состоянии может быть введение сукцината для нормального функционирования цикла Кребса [20].

Сукцинат кальция – это производное янтарной кислоты, которое участвует в метаболических процессах, играя важную роль в цикле Кребса. Представляет собой продукт метаболизма альфа-кетоглутарата, имеющего решающее значение в процессе клеточного метаболизма, фосфорилирования субстратного уровня, утилизации кетоновых тел и метаболизма гема. Было отмечено дозозависимое влияние сукцината на гипертрофию скелетных мышц и синтез белка [18].

Введение в рацион крыс, находящихся в условиях гравитационной разгрузки, препаратов, содержащих субстраты цикла трикарбоновых кислот, способствует увеличению активности сукцинатдегидрогеназы

и глицерофосфатдегидрогеназы. Значит, избыточное количество янтарной кислоты – сукцината – может оказывать стимулирующее действие на интенсивность клеточного дыхания. Протекторное свойство препарата играет решающую роль при нормализации работы первого комплекса дыхательной цепи (сукцинат – коэнзим Q – оксидоредуктаза) в митохондриях мышечных волокон в условиях функциональной разгрузки и направлено на сохранение и стимуляцию энергообразующей функции митохондрий [19].

Таким образом, сукцинат кальция улучшает энергетический обмен в мышечной ткани, так как увеличивает уровень АТФ в клетках, что может повышать выносливость животных и профилактировать снижение продуктивности в условиях гипокинезии.

Незаменимая аминокислота триптофан является субстратом для образования нескольких биоактивных соединений с важными физиологическими функциями [21]. Это один из предшественников синтеза внутриклеточного никотинамидадениндинуклеотидфосфата (NAD+), который участвует в различных биологических процессах в клетке: энергетическом метаболизме, восстановлении ДНК, передаче сигналов. NAD+ не только задействован в окислительно-восстановительных реакциях, но и выступает субстратом для регуляторных белков нескольких семейств, контролирующих важнейшие механизмы жизнедеятельности клеток человека и животных [22]. Катаболиты, продуцируемые в мозге из триптофана (кинуренины), различным образом влияют на биохимию мозга, воздействуя на рецепторы глутамата (например, на рецептор N-метил-D-аспартата). Кинуренины участвуют в воспалении, иммунном ответе и возбуждающей нейротрансмиссии. Триптофан служит единственным субстратом для синтеза биогенного амина серотонина [21, 23]. Увеличение уровня серотонина в организме снижает стресс и тревожность, что особенно важно для животных в условиях их интенсивного выращивания или транспортировки. Триптофан также может способствовать улучшению пищеварения и усвоению питательных веществ.

Таким образом, сукцинат кальция и аминокислота триптофан обладают синергетическим действием и обеспечивают стимуляцию энергетического метаболизма, а также быстрое восстановление продуктивности животных во время адаптации к стрессовому фактору (гипокинезия).

Влияние различных доз комбинации сукцината кальция и триптофана на коррекцию двигательных нарушений после антиортостатической гипокинезии

В рамках первого опыта в тесте «Сужающаяся дорожка» выявлено, что после антиортостатической нагрузки изменилась моторика передних и задних конечностей у животных всех групп (таблица 2). Несмотря на то что были обездвижены только задние лапы, при перемещении мышей наблюдались соскальзывания не только задних, но и передних конечностей, так как из-за сниженной двигательной функции задних лап нагрузка на передние возрастала, что приводило к возникновению ошибок в постановке кистей.

Таблица 2 – Результаты теста «Сужающаяся дорожка»

Группа	Период тестирования	Передняя конечность			Задняя конечность			Время прохождения дорожки, с
		Промахи, %	Соскальзывания, %	Общее количество шагов	Промахи, %	Соскальзывания, %	Общее количество шагов	
Первая (опытная)	До начала опыта	2,8	0,3	16,8	0,9	2,9	16,5	11,3
	В конце опыта	10,3	1,7	18,7	6,1	5,1	17,3	12,9
Вторая (опытная)	До начала опыта	0	0	16,3	0,4	1,7	16,2	10,3
	В конце опыта	2,1	1,2	20,3	4	2,5	17,9	12,2
Третья (опытная)	До начала опыта	0	0,8	16,6	1,1	2,3	17,2	10,1
	В конце опыта	2,9	2,7	18,8	4,1	3	17,6	12
Четвёртая (контрольная)	До начала опыта	0,6	0,9	17,3	1,1	1,3	17,1	10,3
	В конце опыта	8,6	5,7	17,5	8,9	4	16,7	12,8

Таблица 2 демонстрирует, что наибольшее количество ошибок постановки и соскальзываний передних и задних конечностей после антиортостатической гипокинезии оказалось в контрольной группе: по сравнению с данными до опыта количество промахов и соскальзываний передних лап возросло соответственно на 8,1 и 4,8 %, задних – на 7,8 и 2,7 %, время прохождения дорожки – на 24,3 %. Наименьшее изменение моторики конечностей животных отмечалось в третьей группе: увеличение количества ошибок постановки и соскальзываний передних лап составило 2,9 и 1,9 %, задних – 3 и 0,6 %, время прохождения дорожки возросло на 18,3 % по сравнению с данными до применения разгрузки задних конечностей. Несущественно отличались показатели моторики лап мышей второй группы: количество ошибок постановки и соскальзываний кистей увеличилось на 2,1 и 1,2 %, стоп – на 3,6 и 0,8 %, время прохождения дорожки – на 19,1 %. У животных первой группы показатели были лучше, чем в контрольной группе, но уступали соответствующим значениям второй и третьей групп: количество ошибок постановки и соскальзываний передних лап возросло на 7,6 и 1,4 %, задних – на 5,1 и 2,1 %, а время прохождения дорожки – на 14,4 %.

Таким образом, по результатам теста «Сужающаяся дорожка» наименьшим изменениям подверглись показатели моторики конечностей грызунов в группах, принимавших добавку в дозах 200 и 400 мг/кг. Подопытные, получавшие 40 мг/кг, продемонстрировали лучшие результаты, чем контрольная группа, но уступали животным второй и третьей групп.

При оценке итогов теста «Горизонтальная лестница» определено, что во всех группах мышей после снятия устройства наблюдалось изменение моторики передних и задних конечностей при прохождении установки (таблица 3). Худшие показатели моторики конечностей выявлены в контрольной группе: количество правильных шагов передней лапы уменьшилось на 5,5 %, соскальзываний и промахов увеличилось на 4,2 и 1,3 %, для задней лапы значения изменились на 5,2, 4,7 и 0,5 % соответственно, время прохождения лестницы возросло на 50,6 %. Наименьшие нарушения моторики задних и передних конечностей наблюдались в третьей группе, получавшей 400 мг добавки на 1 кг живой массы: количество правильных шагов передней лапы снизилось на 1 %, соскальзываний оказалось больше на 0,3 %, а промахов – на 0,8 %, количество правильных шагов задней лапы уменьшилось на 1,8 %, соскальзываний увеличилось на 1,8 %, а число промахов не отличалось от первоначального значения, время прохождения лестницы возросло на 40,1 %.

Таблица 3 – Результаты теста «Горизонтальная лестница»

Группа	Период тестирования	Передняя конечность				Задняя конечность				Время прохождения лестницы, с
		Правильные шаги, %	Соскальзывания, %	Промахи, %	Общее количество шагов	Правильные шаги, %	Соскальзывания, %	Промахи, %	Общее количество шагов	
Первая (опытная)	До начала опыта	100	0	0	11,5	100	0	0	11	7,3
	В конце опыта	95,6	3,5	0,9	12	98,1	1,9	0	10,8	8,2
Вторая (опытная)	До начала опыта	98,9	0,5	0,1	10,6	100	0	0	10,6	8,5
	В конце опыта	96,7	2,4	0,9	11,4	98,1	1,9	0	11,6	11,5
Третья (опытная)	До начала опыта	98,9	1,1	0	12,5	100	0	0	11,3	7,6
	В конце опыта	97,9	1,4	0,8	13,8	98,2	1,8	0	11,6	10,7
Четвёртая (контрольная)	До начала опыта	99,6	0,4	0	12,7	100	0	0	11,6	7,8
	В конце опыта	94,2	4,6	1,3	12,1	94,8	4,7	0,5	10,6	11,7

Результаты животных второй группы после антиортостатической нагрузки в тесте «Горизонтальная лестница» несущественно расходились с показателями моторики конечностей мышей третьей группы: правильных шагов передней лапы стало на 2,3 % меньше, количество соскальзываний увеличилось на 1,9 %, промахов – на 0,9 %, правильных шагов задней лапы уменьшилось на 1,9 %, соскальзываний увеличилось на 1,9 %, промахов не было, а время прохождения лестницы возросло на 34,8 % по сравнению с первоначальным значением. В первой группе, получавшей наименьшую дозу препарата, результаты были хуже, чем у животных, принимавших большие дозы, но превышали показатели контрольной группы: количество правильных шагов передней лапы уменьшилось на 4,4 %, соскальзываний и промахов увеличилось на 3,4 и 0,9 % соответственно, правильных шагов задней лапы снизилось на 1,9 %, соскальзываний стало больше на 1,9 %, промахов не наблюдалось, при этом время прохождения лестницы возросло на 12,6 %.

Таким образом, в тесте «Горизонтальная лестница» минимальные ухудшения моторики конечностей мышей после антиортостатической нагрузки имели место во второй и третьей группах по сравнению с показателями до начала опыта и контрольной группы. Локомоторная активность конечностей животных первой группы, получавшей самую низкую дозу препарата, также превосходила показатели моторики конечностей мышей контрольной группы, однако уступала ряду соответствующих показателей второй и третьей групп.

Измерение окружности голени грызунов позволило определить, что во всех группах в процессе воздействия на животных антиортостатической гипокинезии отмечалась потеря мышечной массы задних лап (таблица 4).

Анализируя данные таблицы 4, можно отметить, что наибольшая потеря мышечной массы голени мыши выявлена в контрольной группе, не получавшей препарат. Меньше всего окружность лапы изменилась в третьей группе. Так, животные за первую неделю опыта не только не утратили объём мышечной массы задней конечности, но даже наблюдался его незначительный прирост (1,5 %), а через две недели эксперимента уменьшение окружности голени составило 2,7 %, что на 10,6 % меньше, чем в контроле. Во второй группе этот показатель через одну неделю достиг 2,9 %, а к концу второй недели опыта – 6,4 %, что на 6,8 % меньше по сравнению с контролем и на 3,7 % больше, чем в третьей группе. В первой группе сокращение объёма мышц через одну неделю практически не отличалось от контроля, а через две недели было на 1,4 % ниже, чем в контроле, и на 5,5 и 9,2 % выше, чем во второй и третьей группах соответственно. После снятия устройств (через три недели опыта) уменьшение окружности голени продолжалось в первой и четвёртой группах, хоть и не столь интенсивно (за неделю снижение объёма составило 0,66 и 1,14 % соответственно). У животных второй и третьей групп через неделю после снятия устройств отмечено некоторое увеличение окружности голени: на 0,1 и 1,72 % соответственно.

Таким образом, уменьшение окружности голени после антиортостатической гипокинезии оказалось наименее выраженным у мышей третьей и второй групп по сравнению с начальными значениями животных контрольной группы.

В процессе опыта зафиксированы изменения живой массы мышей под воздействием антиортостатической нагрузки (таблица 5).

Таблица 4 – Изменение окружности голени мышей под воздействием антиортостатической гипокинезии

Группа	Длина окружности голени, см				Уменьшение окружности голени по отношению к значению до опыта, %		
	до опыта	через одну неделю	через две недели	через три недели	через одну неделю	через две недели	через три недели
Первая (опытная)	2,31 ± 0,17	2,18 ± 0,12	2,03 ± 0,06	2,02 ± 0,05	5,63	11,85	12,43
Вторая (опытная)	2,09 ± 0,09	2,03 ± 0,05	1,95 ± 0,09	1,96 ± 0,11	2,87	6,39	6,29
Третья (опытная)	1,98 ± 0,2	2,01 ± 0,12	1,93 ± 0,18	1,96 ± 0,18	0	2,65	0,93
Четвёртая (контрольная)	2,25 ± 0,13	2,13 ± 0,11	1,95 ± 0,08	1,93 ± 0,13	5,33	13,23	14,22

Таблица 5 – Динамика живой массы мышей под воздействием антиортостатической гипокинезии

Группа	Живая масса мышей, г			
	до опыта	через одну неделю	через две недели	через три недели
Первая (опытная)	35,3 ± 1,5	33 ± 2,5	33,3 ± 2,7	37 ± 2,6
Вторая (опытная)	36,6 ± 3,6	34,2 ± 3,6	34,6 ± 3,6	37,8 ± 3,6
Третья (опытная)	34,4 ± 4,1	31,6 ± 3,8	34,3 ± 3,6	38 ± 3,6
Четвёртая (контрольная)	36 ± 1	33,7 ± 2,5	33,3 ± 2,1	37 ± 2,7

Данные таблицы 5 свидетельствуют о том, что на протяжении первой недели обездвижения задних конечностей наблюдалась потеря живой массы во всех группах. Со второй недели снижение продолжилось у животных первой и четвёртой групп, во второй и третьей группах мыши начали набирать массу, причём в третьей группе – наиболее интенсивно (недельный прирост составил 1,17 и 8,5 % соответственно).

По отношению к начальным значениям на протяжении первой недели опыта потеря живой массы мышей всех групп была практически одинаковой (рисунок 3). К концу второй недели опыта (перед снятием разгрузочных устройств) наименьшее снижение массы зафиксировано в третьей группе (0,4 % по отношению к первоначальной), что говорит о следующем: мыши, получавшие наибольшую дозу препарата, быстрее приспосабливались к антиортостатической нагрузке.

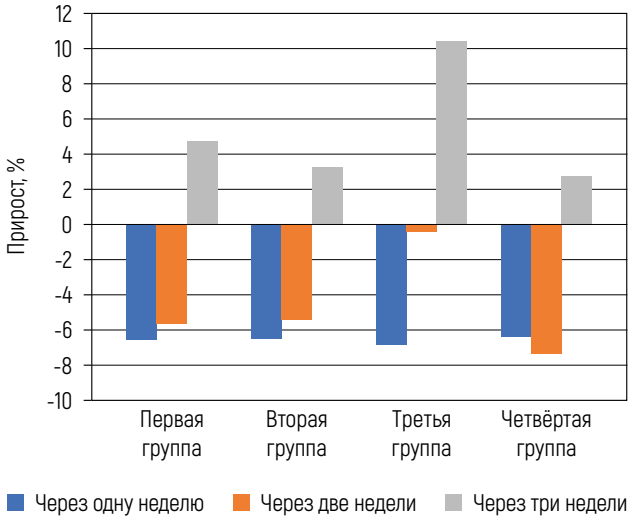


Рисунок 3 – Динамика прироста живой массы мышей (по отношению к начальной)

После снятия устройств начался активный набор массы, причём самая существенная прибавка отмечена в третьей группе: на 7,7 % больше, чем в контрольной, на 5,8 % больше, чем в первой, и на 7,2 % больше, чем во второй группе.

Таким образом, снижение живой массы при разгрузке задних конечностей было менее выражено у животных, получавших максимальную дозировку препарата. Кроме того, в этой группе – наивысший прирост живой массы за период наблюдения.

Влияние различных доз комбинации сукцината кальция и триптофана на прирост живой массы и общее состояние молодняка мышей

На протяжении второго опыта во всех группах мышей наблюдалось увеличение живой массы (таблица 6).

Живая масса мышей через одну неделю эксперимента была больше в опытных группах по сравнению с контролем: в первой группе – на 23,1 % ($P < 0,15$), во второй – на 22 % ($P < 0,05$), в третьей – на 31,4 % ($P < 0,05$). Через две недели данный показатель у опытных животных также превосходил контроль: в первой группе – на 22,9 % ($P < 0,05$), во второй – на 16,6 % ($P < 0,05$), в третьей – на 30 % ($P < 0,05$). Через три недели живая масса опытных мышей продолжала превышать массу контрольных животных: в первой группе – на 10 % ($P < 0,25$), во второй – на 4 %, в третьей – на 17,8 % ($P < 0,15$).

К концу эксперимента живая масса мышей контрольной группы практически сравнялась с массой в опытных группах; несколько больше весили животные третьей группы – на 13,4 %. Различий между живой массой мышей опытных групп в процессе эксперимента не выявлено.

Таблица 6 – Динамика живой массы молодняка мышей

Группа	Живая масса мышей, г				
	до опыта	через одну неделю	через две недели	через три недели	через четыре недели
Первая (опытная)	20,3 ± 1,5	29,8 ± 3,2	34,8 ± 3,3*	38,3 ± 1,7	39 ± 0,8
Вторая (опытная)	20,3 ± 1,7	29,5 ± 1,7*	33 ± 0,8*	36,3 ± 0,5	37,3 ± 1,3
Третья (опытная)	20,8 ± 2,1	31,8 ± 3,8*	36,8 ± 3,8*	41 ± 5	42,3 ± 5,5
Четвёртая (контрольная)	19,5 ± 1,5	24,2 ± 3,4	28,3 ± 4	34,8 ± 5,3	37,3 ± 5,5

* P < 0,05.

Наивысший еженедельный прирост массы зафиксирован у животных всех групп в первую неделю эксперимента: в первой группе – 46,9 %, во второй – 45,7 %, в третьей –53 % и в четвёртой – 23,9 % (рисунок 4). Далее набор массы мышей постепенно снижался в группах, получавших добавку к рациону, и к третьей неделе опыта животные практически достигли своей максимальной живой массы. В четвёртой (контрольной) группе прирост живой массы был менее интенсивным и более плавным.

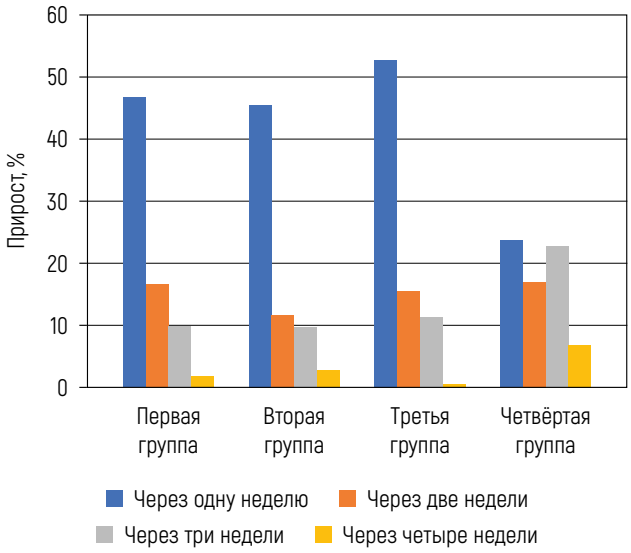


Рисунок 4 – Динамика прироста живой массы мышей

Таким образом, у животных, получавших комбинацию сукцината кальция и триптофана, наблюдался более интенсивный прирост живой массы, особенно в первую неделю (рисунок 4), и большая живая масса к концу опыта, которая была практически достигнута на одну неделю раньше, чем в контроле (таблица 6). Максимальные значения прироста и живой массы зафиксированы в третьей группе, получавшей 200 мг разработанной добавки на 1 кг живой массы.

Для оценки общего состояния мышей проводился анализ гематологических показателей крови, физико-химических показателей мочи.

Общий клинический анализ крови контрольных животных выявил незначительную эритропению у одной особи. Гематологические показатели подопытных не имели существенных отличий от физиологической нормы. При этом у грызунов, получавших комбинацию сукцината кальция и триптофана, отмечалось большее содержание в крови эритроцитов (на 65,2–105,8 %), гемоглобина (на 4,7–15 %) и более высокий показатель гематокрита (на 38,4–50,1 %) по сравнению с контрольной группой.

Показатели мочи мышей опытных групп (pH, удельная плотность, присутствие лейкоцитов, нитритов, белка, крови, кетонов, билирубина, глюкозы) практически соответствовали физиологической норме и показателям мочи в четвёртой группе.

При микроскопии осадка мочи зафиксировано минимальное количество кристаллов в образцах, взятых в контрольной группе. В моче животных, получавших с кормом комбинацию сукцината кальция и триптофана, соли отсутствовали. В организованном осадке проб, взятых у мышей контрольной и опытных групп, обнаружены единичные лейкоциты и клетки эпителия в поле зрения; эритроциты не выявлены. В целом исследование мочи животных всех групп не показало отклонений от физиологической нормы.

Таким образом, у мышей, получавших разработанную комбинацию с кормом, не отмечены отклонения от нормативных показателей крови и мочи. Более того, в крови подопытных наблюдалось более высокое содержание эритроцитов и гемоглобина по сравнению с контрольными

животными, что говорит о лучшем функционировании кроветворной системы. Исследование мочи грызунов не выявило патологий мочевыделительной системы, однако у контрольных животных присутствовали кристаллы солей в минимальном количестве, в то время как в моче опытных групп не найдено неорганического компонента осадка, что свидетельствует о нормализации обмена минеральных веществ при использовании с кормом разработанной комбинации.

Заключение

В отделе биотехнологий ЗАО «Струнные технологии» (г. Минск, Беларусь) разработана комбинация сукцината кальция и триптофана в соотношении, оптимальном для животных, с целью коррекции двигательных нарушений при гипокинезии, увеличения продуктивности, улучшения общего состояния и повышения стрессоустойчивости.

Использование данной добавки для животных, которые находятся в стрессовых условиях, возникших вследствие гипокинезии, в дозе 200–400 мг на 1 кг живой массы позволяет:

- уменьшить негативное влияние фактора гипокинезии (антиортостатическая нагрузка) на моторику конечностей: на 3,2–4,5 % меньше неправильных шагов передних конечностей и на 3,3–3,4 % – задних конечностей на установке «Горизонтальная лестница»; на 8,1–9,6 % меньше неправильных шагов передних конечностей и на 6,1–6,9 % – задних конечностей на установке «Сужающаяся дорожка»;
- снизить потерю объёма мышц конечностей на 7,93–13,29 %;
- уменьшить потерю живой массы вследствие наличия длительного стрессового фактора на 2,1–7,2 %;
- ускорить восстановление прироста живой массы после выхода из стрессового состояния (на 7,7 % больше по сравнению с контролем относительно начальной массы).

Применение комбинации сукцината кальция и триптофана для молодняка животных в дозе 40–200 мг на 1 кг живой массы содействует:

- увеличению среднесуточного прироста (до 20,9 %) и максимальному набору живой массы (на 13,4 % выше по сравнению с контролем) за более короткий период;
- улучшению общего состояния за счёт стимуляции энергетического, минерального обмена, эритропоэза.

Таким образом, использование комбинации сукцината кальция и триптофана представляет собой многообещающий способ сохранения здоровья и повышения продуктивности животных на Земле (например, при ведении органического сельского хозяйства, организации линейных городов и др.) и в условиях замкнутых экосистем в космосе (например, в ЭКД). Подтверждение возможности применения добавки основано на механизмах действия входящих в неё компонентов, их синергетическом эффекте и ожидаемых долгосрочных преимуществах для животных, что делает разработку ценным инструментом и в современном животноводстве.

Будущие исследования должны сосредоточиться на оптимизации дозировок и оценке долгосрочных эффектов представленной комбинации для различных видов животных.

Список основных источников

1. *Организация внутреннего пространства ЭкоКосмоДома на планете Земля / А.Э. Юницкий, Е.В. Ермачёк, И.В. Налётов, В.А. Платонова // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы III междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 12 сент. 2020 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2021. – С. 332–343.*
2. *Юницкий, А.Э. Применение Chlorella vulgaris для повышения эффективности перепеловодства в ЭкоКосмоДоме / А.Э. Юницкий, А.М. Павлюченко, Н.В. Жешко // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 286–295.*
3. *Effects of Hypodynamia–Hypokinesia on the Muscle Spindle Discharges of Rat Soleus Muscle / L. De-Doncker, F. Picquet, J. Petit, M. Falempin // Journal of Neurophysiology. – 2003. – Vol. 89, iss. 6. – P. 3000–3007.*
4. *Баккур, Х.А. Издержки научно-технического прогресса – гипокинезия и гиподинамия / Х.А. Баккур // Диалог языков и культур: сб. материалов I междунар. VII респ. студ. чтений, Минск, 22 нояб. 2017 г. / отв. ред. Т.Н. Мельникова. – Минск, 2018. – С. 56–59.*
5. *Мальцева, Н.Г. Влияние гипокинезии на структуру миокарда / Н.Г. Мальцева, Т.Г. Кузнецова // Проблемы здоровья и экологии. – 2008. – № 2 (16). – С. 113–118.*

6. *Гизатуллин, А.Н. Характеристика биохимических показателей крови бычков при адаптации к гипокинезии / А.Н. Гизатуллин // Учёные записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. – 2014. – Т. 219. – С. 113–117.*
7. *Белобороденко, М.А. Сократительная функция матки у коров, находящихся в условиях гиподинамии, и методы коррекции / М.А. Белобороденко // Учёные записки учреждения образования «Витебская ордена «Знак Почёта» государственная академия ветеринарной медицины». – Витебск, 2011. – Т. 47, вып. 2, ч. 2. – С. 11–15.*
8. *Гизатуллина, Ф.Г. Влияние гиподинамии на иммунный статус организма телят / Ф.Г. Гизатуллина, Э.И. Шигабутдинова // АПК России. – 2019. – Т. 26, № 5. – С. 851–856.*
9. *Влияние стрессовой чувствительности на мясную продуктивность и качество мяса свиней, выращенных в условиях гиподинамии / А.И. Кузнецов, Т.И. Бежинарь, Н.П. Смолякова, А.Н. Левицкий // Ветеринарная медицина – агропромышленному комплексу России: материалы междунар. науч.-практ. конф., Троицк, 1–3 февр. 2017 г. / М-во сел. хоз-ва Рос. Федерации [и др.]; отв. ред. М.Ф. Юдин. – Троицк, 2017. – С. 114–121.*
10. *Горбунов, Ю.А. Продуктивные и клинико-физиологические показатели сухостойных коров в связи с организацией принудительного моциона / Ю.А. Горбунов, Н.Г. Минина, В.М. Добрук // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства: сб. науч. тр. / УО «Белорус. гос. с.-х. акад.». – Горки, 2011. – Вып. 14, ч. 2. – С. 36–42.*
11. *Иванова, И.П. Продуктивное долголетие коров в зависимости от системы содержания / И.П. Иванова, М.Е. Григорьев, В.К. Пилипчук // Вестник КрасГАУ. – 2020. – № 6 (159). – С. 126–130.*
12. *A Mouse Model of Disuse Osteoporosis Based on a Movable Noninvasive 3D-Printed Unloading Device / J. Li, J. Geng, T. Lin [et al.] // Journal of Orthopaedic Translation. – 2022. – Vol. 33. – P. 1–12.*
13. *Методики изучения физиологических функций лабораторных животных для доклинических исследований в спортивной медицине / В.Н. Каркищенко, Ю.В. Фокин, Л.Х. Казакова [и др.] // Биомедицина. – 2012. – № 4. – С. 15–21.*
14. *Морковин, Е.И. Оценка психоневрологического дефицита у грызунов: основные методы / Е.И. Морковин, Д.В. Куркин, И.Н. Тюренков // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. – 2018. – Т. 68, № 1. – С. 3–15.*
15. *Репс, В.Ф. Тесты оценки поведенческой и двигательной активности при травме спинного мозга в эксперименте / В.Ф. Репс // Современные вопросы биомедицины. – 2023. – Т. 7 (4). – С. 209–215.*
16. *Оценка сенсомоторного дефицита в отдалённом периоде после ишемии/гипоксии головного мозга неонатальных крыс / Д.Н. Силачёв, М.И. Шубина, С.С. Янкаускас [и др.] / Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. – 2013. – Т. 63, № 3. – С. 405–416.*
17. *Справочник. Физиологические, биохимические и биометрические показатели нормы экспериментальных животных / Т.В. Абрашова, Я.А. Гущин, М.А. Ковалева [и др.]; под ред. В.Г. Макарова, М.Н. Макаровой. – СПб.: Изд-во «ЛЕМА», 2013. – 116 с.*
18. *Чистякова, Е.Ю. Влияние курсового введения производных аминоэтанола на рост мышечной ткани у мелких экспериментальных животных / Е.Ю. Чистякова // Инновации и здоровье нации: сб. материалов VI всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 14–15 нояб. 2018 г. / С.-Петерб. гос. хим.-фармацевт. ун-т. – СПб., 2018. – С. 440–444.*
19. *Огнева, И.В. Изменения клеточного дыхания волокон постуральных мышц крысы в условиях длительной гравитационной разгрузки при добавлении в рацион сукцината / И.В. Огнева, О.М. Веселова, И.М. Ларина // Биофизика. – 2011. – Т. 56, № 1. – С. 122–128.*
20. *Орлов, Ю.П. Энергетический дефицит при критических состояниях: значение сукцинатов / Ю.П. Орлов // Медицина неотложных состояний. – 2016. – № 7 (78). – С. 124–131.*
21. *Cervenka, I. Kynurenines: Tryptophan's Metabolites in Exercise, Inflammation, and Mental Health / I. Cervenka, L.Z. Agudelo, J.L. Ruas // Science. – 2017. – Vol. 357, iss. 6349. – URL: https://www.science.org/doi/10.1126/science.aaf9794/ (date of access: 05.05.2025).*
22. *Куликова, В.А. Роль NAD в регуляторных процессах в клетках человека и животных / В.А. Куликова, Д.В. Громыко, А.А. Никифоров // Биохимия. – 2018. – Т. 83, вып. 7. – С. 987–1001.*
23. *Шейбак, В.М. Триптофан: ключевой метаболит гомеостаза и регулятор функций организма / В.М. Шейбак, А.Ю. Павлюковец // Гепатология и гастроэнтерология. – 2021. – Т. 5, № 2. – С. 143–149.*

УДК 615.322+629.7

Адаптогены для повышения устойчивости к стрессу жителей ЭкоКосмоДома

А.Э. Юницкий[1, 2]
доктор философии транспорта

В.В. Корней[2]

Т.П. Соколова[2]

Н.С. Зыль[2]

Н.В. Жешко[2]

[1] ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

[2] ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

Земные и космические урбанистические составляющие программы «ЭкоМир» – линейные города, в том числе экваториальные, и ЭкоКосмоДома (ЭКД) – являются экологически ориентированными моделями организации жизни, в которых особое внимание уделяется здоровью и благополучию человека. Как для современных жителей на Земле, так и для обитателей ЭКД всегда актуальной будет проблема борьбы со стрессом, который оказывает негативное влияние на физическое и психическое состояние. Чем дольше мы пребываем в напряжении, тем тяжелее последствия для нашего организма. Значит, важно использовать комплексный подход, включающий изменение образа жизни, развитие навыков управления стрессом, социальную поддержку и обращение к специалистам.

В настоящее время люди выбирают экологически чистые продукты, биологически активные добавки (БАД) и лекарственные травы, стремясь гармонично соединить природные средства с заботой о сохранении своего физического и духовного баланса. В линейных городах и ЭКД предполагается использовать БАДы, выращенные в местных, экологически чистых условиях, для укрепления иммунитета, повышения энергии, снижения негативных последствий стресса и восполнения дефицита необходимых для здоровья микронутриентов. Одним из известных адаптогенов является лекарственное растение элеутерококк колючий (*Eleutherococcus senticosus* (Rupr. et Maxim.)), который неприхотлив к среде культивирования и обладает рядом полезных свойств для организма человека.

Цель работы – изучение ценных биологических свойств адаптогенов, а именно элеутерококка колючего, и осуществление эксперимента по определению влияния спиртового экстракта данного растения на показатели стрессоустойчивости и двигательной активности мышей.

Результаты исследования могут быть применены для подбора и тестирования растений, способствующих улучшению здоровья человека в ЭКД.

Ключевые слова:
адаптогены, биологически активные добавки, стрессоустойчивость, ЭкоКосмоДом (ЭКД), элеутерококк.

UDC 615.322+629.7

Adaptogens to Increase Stress Resistance Among EcoCosmoHouse Residents

A. Unitsky[1, 2]
Dr. of Philosophy
in Information Technologies
(Transport)

V. Karnei[2]

T. Sakalova[2]

N. Zyl[2]

N. Zheshka[2]

[1] Astroengineering Technologies LLC,
Minsk, Belarus

[2] Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

The terrestrial and space urban components of the EcoSpace program – linear cities, including equatorial ones, and the EcoCosmoHouses (ECH) – are environmentally oriented models of life organization that place special emphasis on human health and wellbeing. For both modern inhabitants of Earth and residents of the ECH, the problem of combating stress, which has a negative impact on physical and mental health, will always be relevant. The longer a person remains under stress, the more severe its consequences for the body. Therefore, it is essential to adopt a comprehensive approach that includes lifestyle modifications, the development of stress-management skills, social support, and, when necessary, professional assistance.

Nowadays, people choose environmentally friendly products, dietary supplements, and medicinal herbs, striving to harmoniously combine natural remedies with caring for their physical and spiritual balance. In the ECH and linear cities, it is proposed to use dietary supplements grown in local, environmentally friendly conditions to strengthen immunity, increase energy, reduce the negative effects of stress, and replenish micronutrients necessary for health. One of the well-known adaptogens is the medicinal plant *Eleutherococcus senticosus* (Rupr. et Maxim.), which is undemanding in terms of cultivation conditions and has a number of beneficial properties for the human body.

The aim of the work is to investigate the valuable biological properties of adaptogens, specifically *Eleutherococcus senticosus*, and to conduct an experiment assessing the effects of its alcohol extract on stress resistance and motor activity in mice.

The results of the study may be used to select and test plants that contribute to improving human health in the ECH.

Keywords:
adaptogens,
dietary supplements,
EcoCosmoHouse (ECH),
Eleutherococcus,
stress resistance.

Введение

ЭкоКосмоДом (ЭКД) представляет собой неотъемлемую часть жилой и производственной инфраструктуры орбитального индустриального комплекса – космического индустриального ожерелья «Орбита». По сути, это замкнутая экосистема биосферного типа, в которой каждый житель должен получать сбалансированное, полноценное питание – основу физического здоровья человека [1, 2].

Под физическим здоровьем понимается нормальное функционирование всех внутренних органов и систем организма, физическая активность, здоровый сон, отсутствие болезней, травм и физических ограничений. На особом месте стоит питание, восполняющее потребность в макро- и микроэлементах, витаминах, белках, жирах, углеводах и клетчатке.

Человек, находящийся на орбитальном индустриальном комплексе, неизбежно будет подвергаться стрессу ввиду изменения условий проживания, привычного социального окружения, выполнения обязанностей, предполагающих высокую степень ответственности. Кратковременный стресс может быть полезным, поскольку мобилизует ресурсы организма для преодоления трудностей. Однако хроническое состояние напряжения разрушительно сказывается на здоровье, обуславливая развитие широкого спектра заболеваний. В современном мире постоянные негативные переживания приводят к большей аллостатической нагрузке, чем острый стресс, который испытывали люди в прошлом [3]. При психоэмоциональном дискомфорте в организме активируется гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковая ось, вызывая высвобождение гормонов стресса, таких как кортизол и адреналин. В условиях длительного нервного истощения эти гормоны негативно влияют на следующие системы человека:

- сердечно-сосудистую – увеличивается риск развития гипертонии, инфаркта миокарда и инсульта;
- иммунную – снижается общая резистентность организма;
- пищеварительную – развиваются синдром раздражённого кишечника, язвенная болезнь и др.;
- нервную – повреждаются нейроны гиппокампа (область мозга, отвечающая за память и обучение), нарушается нейротрансмиссия, что может стать причиной проявления депрессии, тревожных расстройств и других психических заболеваний;
- эндокринную – повышается риск развития сахарного диабета II типа [4–6].

В связи с этим возрастает интерес к использованию БАДов как потенциального инструмента для повышения устойчивости организма к неблагоприятным факторам. Главным источником природных биологически активных соединений являются лекарственные растения [7, 8].

Ключевые аспекты эффективности БАДов – химический состав и наличие биологически активных компонентов (флавоноиды, сапонины, полисахариды, эфирные масла и др.), которые могут оказывать разнообразное воздействие: стимулировать иммунитет, улучшать обмен веществ, снижать уровень стресса, способствовать восстановлению организма.

БАДы делятся на категории в зависимости от состава и назначения:

- витаминно-минеральные комплексы – содержат витамины и минералы, полезные для профилактики гиповитаминозов и минералодефицитов;
- растительные экстракты и фитопрепараты – включают травяные компоненты, обладающие адаптогенными, противовоспалительными и иммуностимулирующими свойствами;
- пребиотики и пробиотики – отвечают за нормализацию микрофлоры кишечника;
- адаптогены – вещества растительного происхождения, повышающие устойчивость организма к стрессам и улучшающие обмен веществ.

Среди имеющихся на рынке БАДов особое место занимают адаптогены. Одним из известных представителей этой группы является элеутерококк колючий (*Eleutherococcus senticosus* (Rupr. et Maxim.)), который положительно воздействует на физическую и умственную работоспособность, а также помогает адаптироваться к неблагоприятным условиям окружающей среды [9].

Цель настоящей работы – изучение биологических свойств элеутерококка колючего, проведение эксперимента по определению влияния спиртового экстракта данного растения на показатели стрессоустойчивости и двигательной активности мышей.

Выбор спиртового экстракта обусловлен рядом причин:

- моделирование исследования. Спиртовой экстракт элеутерококка – традиционная форма применения этого растения в медицине, он активно используется в качестве тонизирующего и адаптогенного средства;
- экстракция активных веществ. Спирт – эффективный растворитель для извлечения широкого спектра биологически активных соединений из растительного сырья, включая элеутерозиды, которые считаются основными действующими веществами элеутерококка;
- биодоступность. Предполагается, что спиртовой экстракт может обеспечивать лучшую биодоступность активных

компонентов элеутерококка по сравнению с другими формами (например, водными экстрактами);

• удобство дозирования и введения. Спиртовой экстракт легко дозировать и вводить животным, что важно в процессе контролируемого эксперимента.

Таким образом, осуществление исследования с современной научно-технической и теоретической базой поможет оценить потенциал применения элеутерококка колючего как адаптогена в условиях замкнутых экосистем.

Фармакологические свойства элеутерококка, его выращивание в ЭКД

Элеутерококк колючий – многолетнее кустарниковое растение, широко используемое в традиционной медицине. Содержит уникальный комплекс биологически активных веществ, таких как сапонины, полисахариды и гликизиды. Одними из ключевых активных компонентов элеутерококка являются элеутерозиды из группы гликозидов, обуславливающие его адаптогенные свойства, потребность в которых растёт с каждым днём, поскольку увеличивается количество факторов стресса в современном мире. Кроме способности стимулировать устойчивость организма к стрессу, физическим и умственным нагрузкам элеутерококк активизирует иммунную систему, ускоряет заживление ран, повышает сопротивляемость к инфекционным заболеваниям, улучшает работоспособность и выносливость, уменьшает усталость и сонливость, защищает клетки организма от повреждающего действия свободных радикалов, нормализует уровень сахара в крови.

Элеутерококк колючий в качестве БАДов, лекарственных средств и фитопрепаратов применяется в различных формах:

• настойки и экстракты – водно-спиртовые или спиртовые растворы, полученные из коры, листьев или корней растения;

• таблетки и капсулы – готовые фармацевтические формы, содержащие сухие экстракты элеутерококка. Удобны для приёма и дозирования, полезны для укрепления иммунной системы и повышения работоспособности;

• порошки – измельчённое сухое сырьё или концентрированные порошки из коры или листьев растения. Используются как добавки к напиткам или в составе комплексных фитопрепаратов.

В замкнутой экосистеме, такой как ЭКД, где каждый ресурс ценен, а психологическое равновесие критически важно, экстракт элеутерококка может раскрыть свой уникальный адаптогенный потенциал и помочь организму человека плавно адаптироваться к стрессам, возникающим в условиях изоляции и ограниченного пространства. Элеутерококк не маскирует отрицательные психоэмоциональные симптомы, а «обучает» организм задействовать внутренние резервы, повышая устойчивость и позволяя обитателям ЭКД сохранять продуктивность, концентрацию внимания и хорошее самочувствие.

Выращивание элеутерококка колючего не отличается особыми сложностями. Средняя температура летом – до 25 °C, в зимнее время выдерживает температуру до –30 °C; количество осадков – до 600 мм в год; предпочитает почву с нейтральной или слабокислой средой. Важное условие – защита от ветра, значит, идеальным вариантом станет применение сплошных живых изгородей [10–12]. При соблюдении этих климатических параметров можно всегда иметь хороший урожай лекарственного растения, которое поможет поддерживать здоровье жителей ЭКД.

Исходя из данных характеристик, принято решение использовать элеутерококк в эксперименте на мышах с целью изучения воздействия на стрессоустойчивость и физическую активность животных.

Материалы и методы исследований

Для опыта по определению влияния спиртового экстракта элеутерококка выбраны мыши по следующим причинам:

• генетическая схожесть. Мыши и люди имеют 85–90 % общих генов, что позволяет исследовать генные механизмы заболеваний и физиологических процессов, аналогичные человеческим;

• физиологическая схожесть. Мыши, как млекопитающие, обладают физиологическими особенностями, характерными и для нашего организма, поэтому служат подходящей моделью для имитации патологических состояний человека. Кроме того, благодаря быстрому размножению и короткому жизненному циклу грызунов можно получать результаты экспериментов за небольшое время и изучать влияние всевозможных факторов на разные стадии существования;

• повышение достоверности исследований. Значительная часть экспериментов по данному препарату ранее осуществлялась без применения современных стандартов и методик;

• экспериментальная управляемость. Мышей легко содержать в лабораторных условиях, контролировать

их питание, поведение, а также параметры окружающей среды [13, 14].

В процессе опыта сформировано четыре группы по пять мышей в каждой (таблица 1).

Первая и вторая группы подвергались антиортостатической гипокинезии (моделирование стрессовых условий) посредством использования подвижного неинвазивного разгрузочного устройства, напечатанного на 3D-принтере QIDI I-Fast (рисунок 1а), которое поддерживало мышь под углом 30° дорсальной оси тела животного к поверхности дна клетки головой вниз (рисунок 1б) [15]. Воздействие антиортостатической гипокинезии оказывалось на протяжении трёх суток, начиная с седьмого дня опыта. Третья и четвёртая группы содержались в стандартной среде без моделирования стресса. Животные первой и третьей групп в течение 21 дня получали с водой спиртовой экстракт элеутерококка в дозе 0,025 мл/кг массы тела. Грызунам второй и четвёртой групп препарат не назначался. Подопытных взвешивали в начале эксперимента, еженедельно на протяжении опыта и после стрессового воздействия [16, 17].

В конце эксперимента (20–21-й день) с животными проведены тесты «Открытое поле» и «Крестообразный лабиринт».

Методика «Открытое поле» использовалась для изучения двигательной активности и поведенческих реакций. Установка для мышей представляла собой площадку (0,25 м^2), разделённую на девять квадратов, ограниченную непрозрачными бортами и имеющую 16 отверстий (модель норки). Грызунов помещали в центр открытого поля. В течение трёх минут регистрировали количество квадратов, пересечённых четырьмя лапами, центровых посещений (горизонтальная активность) (рисунок 2а), пристеночных и свободных стоек (вертикальная активность) (рисунок 2б), заглядываний в отверстия (норковый рефлекс) (рисунок 2в). Критерием седативного или стимулирующего действия считали изменение показателей горизонтальной и вертикальной двигательной активности. Кроме того, регистрировали вегетативную деятельность: дефекация (рисунок 2г), мочеиспускание, груминг.

а)

б)

Рисунок 1 – 3D-печатное разгрузочное устройство:
а – общий вид;
б – с зафиксированной мышью

Таблица 1 – Схема опыта по определению влияния спиртового экстракта элеутерококка колючего на показатели стрессоустойчивости и двигательной активности мышей

Группа	Количество мышей	Моделирование стрессовых условий	Применение спиртового экстракта элеутерококка
Первая (опытная)	5	+	+
Вторая (контрольная)	5	+	–
Третья (опытная)	5	–	+
Четвёртая (контрольная)	5	–	–

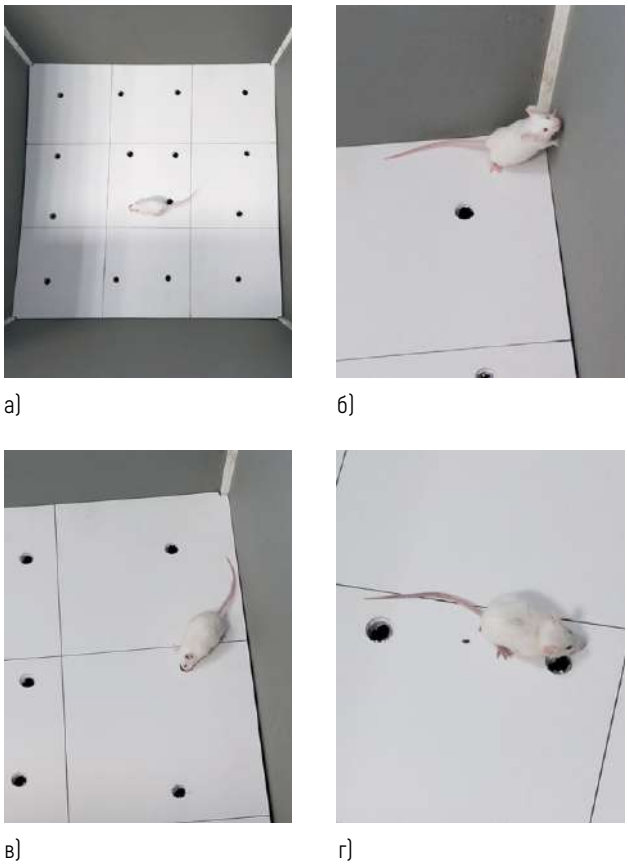


Рисунок 2 – Прохождение теста «Открытое поле»:
а – горизонтальная активность; б – вертикальная активность;
в – норковый рефлекс; г – вегетативная активность

С помощью теста «Крестообразный лабиринт» определяли общую двигательную активность и стрессоустойчивость мышей. Данная методика основана на естественной поведенческой реакции грызунов, проявляющейся в предпочтении тёмных нор, страхе открытых пространств и высоты. В ходе исследования оценивалось, как воздействует на мышей (состояние тревожности, эмоциональная и двигательная активность) принимаемая ими добавка – спиртовой экстракт элеутерококка. Экспериментальная установка состояла из приподнятых двух светлых (30 × 5 см) и двух тёмных (30 × 5 см) рукавов, расположенных перпендикулярно друг к другу. Высота над полом – 0,5 м. Продолжительность теста для каждого подопытного – 3 мин. Животное помещали в центр лабиринта и фиксировали число заходов в светлые (рисунок 3а) и тёмные рукава (рисунок 3б), количество вертикальных стоек и свешиваний (рисунок 3в) для определения общей двигательной активности. Частоту заходов в светлые рукава и время нахождения в них использовали для оценки уровня тревожности, а время пребывания на центральной площадке (рисунок 3г) – как показатель принятия решения.

После завершения опыта проведён анализ полученных данных и выполнена их статистическая обработка. С помощью программного пакета Microsoft Excel рассчитано среднеквадратическое отклонение для выборки и *t*-критерий Стьюдента для оценки достоверности различий выборок [18, 19].

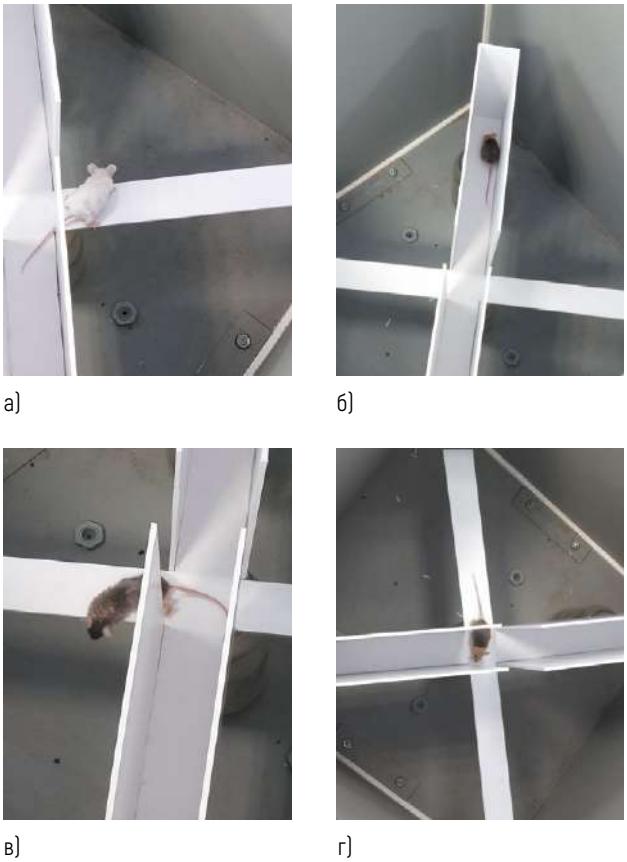


Рисунок 3 – Прохождение теста «Крестообразный лабиринт»:
а – в светлом рукаве; б – в тёмном рукаве;
в – свешивание со светлого рукава;
г – нахождение на центральной площадке

Влияние спиртового экстракта элеутероккока на двигательную активность мышей и их стрессоустойчивость

Одним из показателей общего состояния организма животных служила живая масса, динамика которой позволила оценить влияние спиртового экстракта элеутероккока на двигательную активность мышей и их стрессоустойчивость.

Исходя из данных таблицы 2, живая масса грызунов всех групп к концу опыта увеличилась. При этом в третьей и четвёртой группах, не подвергавшихся стрессу, рассматриваемый параметр оказался больше по сравнению с первой и второй группами, так как во время воздействия на животных стрессового фактора у них отмечалась потеря живой массы в среднем на 10 %. К концу опыта живая масса первой и второй групп незначительно отличалась от третьей и четвёртой.

На 21-й день наибольший прирост живой массы – у мышей третьей и четвёртой групп (56,3 и 54,2 % соответственно) (рисунок 4). Минимальный прирост выявлен в первой группе – 35,5 %, что на 8,4 % меньше, чем во второй. Однако за первую неделю опыта минимальный прирост был во второй группе (на 3,7 % меньше по сравнению с первой).

Таким образом, прирост живой массы мышей в группах, подвергнутых антиортостатической гипокинезии (первая и вторая), значительно ниже, чем в третьей и четвёртой группах. При сравнении прироста живой массы между группами, получавшими (первая и третья) и не получавшими препарат (вторая и четвёртая), существенной разницы не обнаружено.

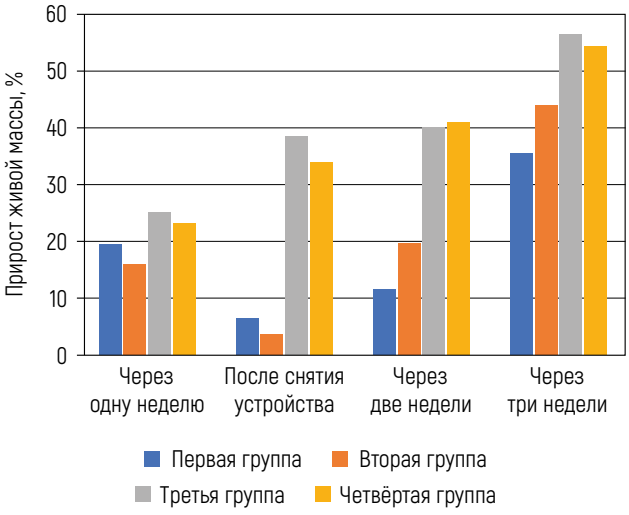


Рисунок 4 – Динамика недельного прироста живой массы мышей за время опыта по отношению к начальной массе, %

Показатели общей двигательной активности, определяемой с помощью теста «Открытое поле», представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Динамика живой массы мышей за время опыта

Группа	Живая масса мышей, г				
	до опыта	через одну неделю	после снятия устройства	через две недели	через три недели
Первая (опытная)	27,6 ± 3,3	33 ± 3,4	29,4 ± 2,7	30,8 ± 3,7	37,4 ± 3,7
Вторая (контрольная)	26,4 ± 3,5	30,6 ± 3,56	27,4 ± 4,3	31,6 ± 5,4	38 ± 6,5
Третья(опытная)	27 ± 2,6	33,8 ± 3,4	37,4 ± 4,4	37,8 ± 4,5	42,2 ± 4,9
Четвёртая (контрольная)	28,4 ± 5	35 ± 6,6	38 ± 6,4	40 ± 6,8	43,8 ± 6

Таблица 3 – Активность мышей в тесте «Открытое поле»

Группа	Количество центровых посещений	Количество дефекаций	Груминг	Количество посещений квадратов	Пристенные стойки	Свободные стойки	Заглядывания в норку
Первая (опытная)	2,4 ± 0,5	3 ± 0,7	0,4 ± 0,2	35 ± 5,9	6 ± 1,7	0,4 ± 0,3	14,2 ± 3
Вторая(контрольная)	2 ± 0,3	2 ± 0,8	0,6 ± 0,2	48 ± 3,3	9,6 ± 1,4	1,4 ± 0,9	13,6 ± 2,9
Третья (опытная)	4 ± 0,6	1 ± 0,6	0,4 ± 0,2	65,8 ± 6,9	12,4 ± 2,5	3 ± 0,9	19,2 ± 3,4
Четвёртая (контрольная)	3 ± 0,7	0,4 ± 0,2	0,6 ± 0,2	49,2 ± 6,2	10,4 ± 3,2	1,6 ± 0,6	14,8 ± 3,6

Наибольшую активность в тесте «Открытое поле» проявляли мыши третьей группы: количество посещений квадратов и центровых посещений (показатели горизонтальной активности) больше на 33,7 % (P < 0,15) и 33,3 % по сравнению с четвёртой группой. Пристеночных и свободных стоек (показатели вертикальной активности) больше на 19,2 и 87,5 % соответственно. Количество заглядываний в норку также было выше по сравнению с контролем на 29,7 %. Группы мышей, подвергнутых стрессу (первая и вторая), были менее активными по сравнению с теми особями, на которых не воздействовал стрессовый фактор. Так, разница между первой и третьей группами (получали спиртовой экстракт элеутерококка) по отдельным показателям (количество центровых посещений, посещений квадратов, пристеночных и свободных стоек) составила от 40 до 80 %. Животные первой группы по сравнению со второй проявляли меньшую активность и уступали мышам второй группы по количеству посещений квадратов, пристеночным и свободным стойкам (на 27,1, 37,5 и 71,4 % соответственно), однако отличались повышенной активностью по количеству центровых посещений (на 20 %) и заглядываний в норку (на 4,4 %). Актов груминга было меньше в 1,5 раза у мышей первой и третьей групп по сравнению с животными второй и четвёртой.

Таким образом, подопытные, получавшие экстракт элеутерококка (третья группа) показали большую двигательную (вертикальную и горизонтальную), а также исследовательскую (заглядывания в норку) активность по сравнению с остальными группами. Мыши, подвергнутые гипокинезии (стрессовый фактор) и принимавшие спиртовой экстракт элеутерококка, менее активны по сравнению с грызунами, не получавшими добавку, однако их исследовательское поведение (центровые посещения и заглядывания в норку) проявлялось несколько ярче.

Для определения стрессоустойчивости мышей и их двигательной активности использовали тест «Крестообразный лабиринт» (таблица 4).

Анализ данных показывает, что в данном тесте активнее вели себя животные третьей группы. По сравнению с контролем (четвёртая группа) длительность посещений светлых рукавов больше в 2,4 раза (P < 0,15), количество посещений светлых рукавов – больше в два раза (P < 0,25), длительность центровых посещений – больше в 1,4 раза, при этом длительность посещений тёмных рукавов – меньше в 1,4 раза (P < 0,15), а количество посещений тёмных рукавов – больше в 1,1 раза. Это говорит о том, что мыши третьей группы, получавшие спиртовой экстракт элеутерококка, менее тревожные и более активные. При сравнении с первой и второй группами, которые подвергались антиортостатической гипокинезии, выявлено, что животные первой группы, принимавшие спиртовой экстракт элеутерококка, превосходили мышей, не получавших добавку, по количеству и длительности посещений светлых рукавов в пять (P < 0,25) и 23,5 (P < 0,05) раза соответственно, количество и длительность посещений тёмных рукавов, а также центровых посещений существенных отличий не имели.

Как продемонстрировано на рисунке 5, длительность одного посещения светлого рукава оказалась наибольшей у животных третьей группы (выше на 18,2 % по сравнению с контрольной четвёртой группой); в этой же группе наименьшая длительность одного посещения тёмного рукава (ниже на 37,6 % относительно контроля). При анализе поведения мышей, подвергнутых стрессовому фактору, определено, что самое длительное посещение светлого рукава – у животных первой группы (выше на 325,5 % по сравнению со второй группой), а длительность посещения тёмного рукава существенной разницы не имела.

Таблица 4 – Активность мышей в тесте «Крестообразный лабиринт»

Группа	Количество посещений светлых рукавов	Количество посещений тёмных рукавов	Длительность посещений светлых рукавов, с	Длительность посещений тёмных рукавов, с	Длительность центровых посещений, с	Количество свешиваний	Количество стоек
Первая (опытная)	1 ± 0,7	8,8 ± 1	4,7 ± 2,7	133,8 ± 13,1	41,5 ± 9,6	6,6 ± 1,1	4 ± 1,3
Вторая (контрольная)	0,2 ± 0,2	9 ± 1,4	0,2 ± 0,2	133,5 ± 11,6	46,3 ± 11,6	4,6 ± 1,4	4,6 ± 0,4
Третья (опытная)	4 ± 1,3	11,4 ± 0,6	31,8 ± 11	86 ± 10,4	62,2 ± 1,8	7,4 ± 2,2	6,2 ± 1,3
Четвёртая (контрольная)	2 ± 0,4	10 ± 1,1	13,5 ± 4,5	120,9 ± 16,8	45,6 ± 14,1	4 ± 0,8	3,8 ± 1,2

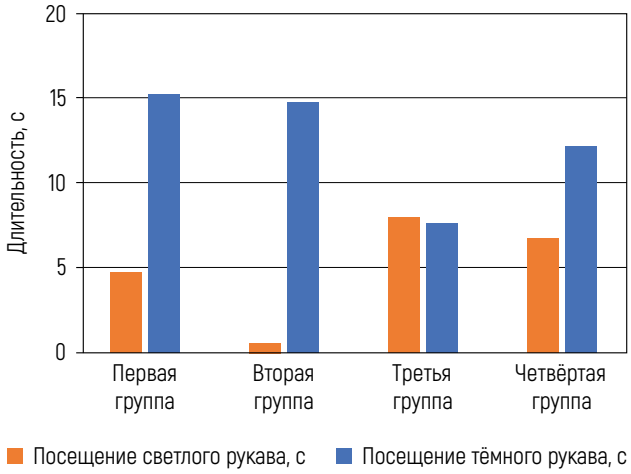


Рисунок 5 – Длительность одного посещения мышами светлого и тёмного рукавов крестообразного лабиринта

Как видно из рисунка 6, в тесте «Крестообразный лабиринт» больше свешиваний было в группах, получавших спиртовой экстракт элеутерококка: в третьей группе – в 1,85 раза ($P < 0,15$) по сравнению с четвёртой, в первой группе – в 1,4 раза ($P < 0,25$) по сравнению со второй и в 1,65 раза ($P < 0,15$) по сравнению с четвёртой группой. Стоек больше в третьей группе – в 1,6 раза по сравнению с четвёртой. Существенной разницы между данным параметром в первой и второй группах не отмечено.

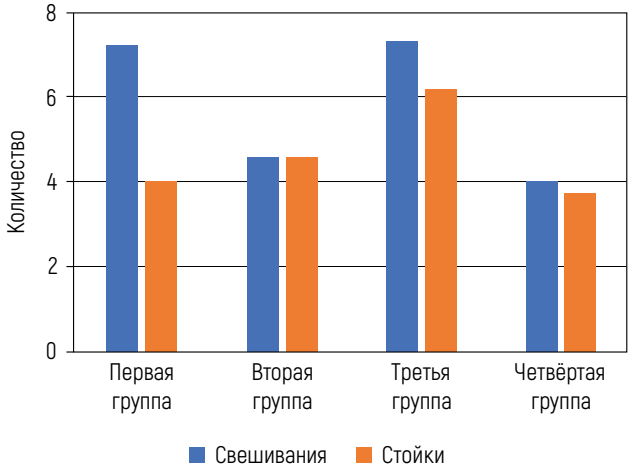


Рисунок 6 – Количество свешиваний и стоек мышей в крестообразном лабиринте

Таким образом, в тесте «Крестообразный лабиринт» наивысшие показатели наблюдались в группе, получавшей спиртовой экстракт элеутерококка и не подвергнутой антиортостатической гипокинезии. Животные, принимавшие препарат и испытывавшие стрессовую нагрузку, также продемонстрировали лучший результат по некоторым критериям теста (количество и длительность посещений светлых рукавов, длительность одного посещения светлого рукава, количество свешиваний) по сравнению с мышами, которым не давали добавку, что говорит о противотревожном эффекте спиртового экстракта элеутерококка.

На основе данных, полученных в ходе опыта, можно сделать вывод: спиртовой экстракт элеутерококка в ежедневной дозе 0,025 мл/кг живой массы, выпаиваемый на протяжении трёх недель, не оказывает существенного влияния на прирост живой массы мышей как при наличии стрессового фактора, так и без него. Однако препарат улучшает общую двигательную активность грызунов и повышает их стрессоустойчивость. При воздействии на животных стрессового фактора (антиортостатическая гипокинезия) в течение трёх суток та же доза способствует ускорению адаптации животных к стрессу, что проявляется в уменьшении тревожности и активации исследовательского поведения, а также позволяет повысить общую двигательную активность.

Заключение

В работе рассмотрена важность контроля стрессовой нагрузки на жителей ЭКД. Ввиду воздействия многочисленных стрессовых факторов и необходимости поддержания здоровья и эмоционального состояния следует обеспечивать полноценное питание, а также применять биологически активные вещества для повышения физической активности и укрепления нервной системы.

Изучено влияние спиртового экстракта элеутерококка на стрессоустойчивость (модель – лабораторные мыши). В результате проведённых исследований определено, что использование данного препарата:

- не вызывает изменений живой массы мышей при наличии и отсутствии стрессового фактора;
- повышает двигательную активность грызунов при отсутствии стрессового фактора: в тесте «Открытое поле» по количеству посещений квадратов и центровых посещений (горизонтальная активность) – на 33,7 и 33,3 % соответственно; по количеству пристеночных и свободных стоек (вертикальная активность) – на 19,2 и 87,5 % соответственно; по количеству заглядываний в норку (исследовательское поведение) – на 29,7 % по сравнению с контрольной

группой; в тесте «Крестообразный лабиринт» по показателям горизонтальной активности – в 1,4–2,4 раза, вертикальной активности – в 1,6–1,85 раза;

• повышает двигательную активность мышей при воздействии стрессового фактора: в тесте «Открытое поле» по показателям горизонтальной активности (центровые посещения) – на 20 %, исследовательского поведения (количество заглядываний в норку) – на 4,4 %; в тесте «Крестообразный лабиринт» по показателям горизонтальной активности – в среднем в два раза, вертикальной активности – в 1,4 раза;

• развивает стрессоустойчивость мышей и создаёт противотревожный эффект: в тесте «Крестообразный лабиринт» количество и длительность посещений светлых рукавов в пять и 23,5 раза больше соответственно по сравнению с контролем, длительность одного посещения светлого рукава в 3,2 раза больше.

Поскольку элеутерококк колючий отличается неприхотливостью выращивания, а его спиртовой экстракт оказывает множество положительных эффектов на живой организм, в условиях ЭКД предлагается культивировать это растение для дальнейшего использования в качестве биологической добавки с целью улучшения общего состояния, повышения двигательной активности и стрессоустойчивости.

Список основных источников

1. *Юницкий, А.Э. Программа ЭкоМир / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 24–77.*
2. *Инновационные и традиционные способы приготовления и сохранения натуральной пищи в ЭкоКосмоДоме / А.Э. Юницкий, Д.А. Конёк, Н.С. Зыль, В.В. Корней // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы V междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 23–24 сент. 2022 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2023. – С. 224–233.*
3. *McEwen, B.S. Stress, Adaptation, and Disease: Allostasis and Allostatic Load / B.S. McEwen // Annals of the New York Academy of Sciences. – 1998. – Vol. 840, iss. 1. – P. 33–44.*
4. *Музаффаров, Ж.Ш. Эндокринная система и стресс: гормональный баланс жизни / Ж.Ш. Музаффаров, Х.Х. Тулкинов, О.Б. Абдуллаев // Tadqiqotlar. – 2025. – Т. 63, № 6. – С. 183–192.*
5. *Мухамедьянова, Г.А. Особенности стресса в современном мире / Г.А. Мухамедьянова // Развитие науки и техники: механизм выбора и реализации приоритетов: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 15 июня 2017 г.: в 3 ч. – Уфа, 2017. – Ч. 3. – С. 197–199.*
6. *Здоровый образ жизни как средство управления рисками для здоровья: компоненты и факторы. Аналитический обзор / Д. Канг, Р.Ч. Ме, Х.М. Камарудин, Р. Сулайман // Анализ риска здоровью. – 2023. – № 4. – С. 158–171.*
7. *Бойко, К.А. Проживание в ЭкоКосмоДоме как способ предупреждения преждевременного старения организма / К.А. Бойко, Д.О. Шемет // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы V междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 23–24 сент. 2022 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2023. – С. 204–213.*
8. *Налетов, И.В. Каллусогенез как альтернативный способ получения биологически активных веществ в замкнутой экосистеме / И.В. Налетов, В.С. Заяц // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы V междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 23–24 сент. 2022 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2023. – С. 186–193.*
9. *Кароматов, И.Д. Адаптоген – элеутерококк, свободоягодник колючий (обзор литературы) / И.Д. Кароматов, З.Т. Набиева // Биология и интегративная медицина. – 2017. – № 11. – С. 147–160.*
10. *Комарова, А.А. Элеутерококк колючий – популярный адаптоген Дальнего Востока: история изучения, исследование биологической и фармакотерапевтической активности / А.А. Комарова, Т.А. Степанова // Дальневосточный медицинский журнал. – 2018. – № 2. – С. 65–71.*
11. *Интродукция элеутерококка колючего (Eleutherococcus senticosus (Rupr. et Maxim.) Maxim.) в горном Дагестане и перспективы его использования / М.А. Газиев, З.И. Абдурахманова, А.Р. Габибова, М.Д. Залибеков // Успехи современного естествознания. – 2019. – № 3. – С. 188–192.*

12. *Davydov, M. Eleutherococcus senticosus (Rupr. & Maxim.) Maxim. (Araliaceae) as an Adaptogen: A Closer Look / M. Davydov, A.D. Krikorian // Journal of Ethnopharmacology. – 2000. – Vol. 72, No. 3. – P. 345–393.*
13. *Galley, H.F. Mice, Men, and Medicine / H.F. Galley // British Journal of Anaesthesia. – 2010. – Vol. 105 (4). – P. 396–400.*
14. *Чадаев, В.Е. Модельные объекты в медицине и ветеринарии / В.Е. Чадаев // Вісник проблем біології і медицини. – 2012. – Вып. 3, т. 2 (95). – С. 140–145.*
15. *A Mouse Model of Disuse Osteoporosis Based on a Movable Noninvasive 3D-Printed Unloading Device / J. Li, J. Geng, T. Lin [et al.] // Journal of Orthopaedic Translation. – 2022. – Vol. 33. – P. 1–12.*
16. *Справочник. Физиологические, биохимические и биометрические показатели нормы экспериментальных животных / Т.В. Абрашова, Я.А. Гущин, М.А. Ковалева [и др.]; под ред. В.Г. Макарова, М.Н. Макаровой. – СПб: Изд-во «ЛЕМА», 2013. – 116 с.*
17. *Оценка сенсомоторного дефицита в отдалённом периоде после ишемии/гипоксии головного мозга неонатальных крыс / Д.Н. Силачёв, М.И. Шубина, С.С. Янкаускас [и др.] // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. – 2013. – Т. 63, № 3. – С. 405–416.*
18. *Петрова, Е.А. Сравнение статистических критериев для оценки достоверности различий между средними значениями выборок, распределённых по различным законам, с помощью средств языка программирования / Е.А. Петрова, Ю.С. Букин // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. – 2014. – Т. 2, № 12-2. – С. 73–79.*
19. *Хлопова, А.Е. Условия применимости t-критерия Стьюдента в медицине / А.Е. Хлопова, И.В. Щербакова // Бюллетень медицинских Интернет-конференций. – 2014. – Т. 4, № 11. – С. 1276–1278.*

УДК 665.52+629.7

Косметические средства для профилактики влияния пониженной гравитации на организм человека в ЭкоКосмоДоме

Е.В. Веремко

А.В. Коледа

ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

Проведён комплексный анализ факторов, влияющих на человека при пребывании в условиях временно пониженной гравитации в замкнутых экосистемах, таких как ЭкоКосмоДом (ЭКД) космического индустриального ожерелья «Орбита» и космический Ковчег. Особое внимание уделено воздействию микрогравитации на кожу, волосы и ногти, включая возможные изменения их структуры и внешнего вида. Цель исследования – создание косметических препаратов, которые характеризуются оптимальным набором натуральных компонентов и поддерживают естественное состояние наружных покровов тела при пониженной гравитации.

В ходе работы подробно изучены свойства ингредиентов природного происхождения, в частности восков, растительных и эфирных масел, и сделан вывод об эффективности и целесообразности их использования при изготовлении косметики, предназначенной для профилактики симптомов, возникающих при пониженной гравитации в условиях ЭКД. Предложенное сырьё представляет собой растительные материалы, которые могут быть культивированы на территории ЭКД и переработаны с применением экологически чистых и безотходных технологий.

В рамках исследования создано пять составов натуральных косметических средств: для роста волос, питания губ, укрепления ногтей, а также для сухой кожи и против воспалений. Каждое средство включает уникальный набор ингредиентов, направленных на решение проблем, вызванных микрогравитацией.

Ключевые слова:
воск, космическое индустриальное ожерелье «Орбита» (КИО «Орбита»), микрогравитация, натуральное косметическое средство, растительное масло, ЭкоКосмоДом (ЭКД), эфирное масло.

UDC 665.52+629.7

Cosmetic Products for Preventing Effects of Reduced Gravity on Human Body in EcoCosmoHouse

Y. Viaremka

A. Kaliada

Unitsky String Technologies Inc., Minsk, Belarus

A comprehensive analysis was conducted on the factors affecting humans during periods of temporary reduced gravity in closed ecosystems such as the EcoCosmoHouse (ECH) of the Industrial Space Necklace "Orbit" and the space Ark. Special attention was given to the effects of microgravity on the skin, hair, and nails, including possible changes in their structure and appearance. The aim of the study is to develop cosmetic products characterized by an optimal combination of organic components that help maintain the natural condition of the body's outer coverings under reduced gravity.

During the research, the properties of organic ingredients – particularly waxes, vegetable oils, and essential oils – were thoroughly studied. Conclusions were drawn regarding the efficiency and feasibility of their use in the production of cosmetics designed to prevent symptoms that occur under reduced gravity in the ECH conditions. The proposed raw materials consist of plant-based substances that can be cultivated within the ECH and processed using environmentally friendly, zero-waste technologies.

As part of the study, five formulations of natural cosmetic products were developed: for hair growth, lip nourishment, nail strengthening, as well as for dry skin, and for anti-inflammatory care. Each formulation contains a unique combination of ingredients targeted at addressing problems caused by microgravity.

Keywords:
EcoCosmoHouse (ECH), essential oil, Industrial Space Necklace "Orbit" (ISN "Orbit"), microgravity, natural cosmetic product, vegetable oil, wax.

Введение

Основа космического индустриального ожерелья «Орбита» (КИО «Орбита») – многофункциональные кластеры, т. е. ЭкоКосмоДома (ЭКД), где будет создана искусственная гравитация по аналогии с земной. В то же время в некоторых из них для нужд производства появится необходимость в пониженной гравитации [1].

Известно, что микрогравитация оказывает значительное влияние на организм человека во время космических полётов. Происходящие изменения представляют собой сочетание проявлений, вызванных физической природой этого фактора, и вторичных преобразований, связанных с адаптацией. Данные процессы сопоставимы с естественным ходом старения на Земле, но в условиях пониженной гравитации они ускоряются [2].

Первичный признак воздействия микрогравитации – устранение гидростатического давления в жидких средах организма, снятие нагрузки на опорные структуры и мышечную систему, что приводит к рефлекторной гипотонии антигравитационных мышц. В дальнейшем активируется вся цепь причинно-следственных связей, приводящих к изменениям в физиологических функциях [2]. Это напрямую отражается на коже человека, которая жизненно важна для защиты организма от вредных факторов окружающей среды. В ходе космических полётов у астронавтов обнаружены признаки повышенной чувствительности кожи и атрофии дермы: увеличение чувствительности кожи на 50,8 % и уменьшение толщины дермы на 15 % [3]. Многочисленные медицинские опыты установили, что в микрогравитационной среде усиливаются воспалительные процессы, проявляющиеся в виде эритематозной, зудящей и сухой кожи, язв, гематом, фолликулита и кожной сыпи [4], замедленного заживления кожных ран из-за снижения накопления дермальных фибробластов в раневом ложе [5]. Вследствие нарушения процессов обновления и питания тканей наблюдаются изменения структуры волосяных фолликулов и склонность к выпадению волос, а также уменьшение прочности и толщины ногтевой пластины [2].

Кроме микрогравитации на организм человека могут влиять дополнительные медико-биологические риски, связанные с выполнением космических полётов, такие как опасность лучевого поражения при воздействии космической радиации, неблагоприятные последствия для здоровья ввиду ухудшения состояния микрофлоры в организме, угроза раннего развития остеопороза из-за отсутствия прямого солнечного излучения [6].

Для минимизации вышеупомянутых симптомов важным является обеспечение правильного ухода, способствующего сохранению здоровья. В связи с этим цель исследования – разработать косметические препараты, которые характеризуются уникальным набором натуральных компонентов и направлены на решение проблем, вызванных пониженной гравитацией. Поставленные задачи: проанализировать условия проживания при пониженной гравитации в ЭКД; оценить влияние микрогравитации на состояние кожи, ногтей и волос при длительном пребывании человека на околоземной орбите; подобрать рецептуры косметических средств на основе натуральных ингредиентов с ценным биохимическим составом.

Анализ натуральных косметических ингредиентов

Согласно исследованиям всё больше потребителей отдают предпочтение натуральным средствам для ухода за телом, которые созданы из растительных ингредиентов. Этот тренд обусловлен желанием использовать безопасные и эффективные продукты, а также поддерживать принципы экологической ответственности [7].

Особенно популярной становится косметика, основанная на восках, растительных и эфирных маслах. Данные компоненты, обладая целым рядом полезных свойств, не только обеспечивают качественный уход, но и позволяют сохранить здоровье кожи без воздействия синтетических веществ. Рассмотрим эти составляющие подробнее.

Воски

Воски – сложные смеси высокомолекулярных соединений, преимущественно состоящие из насыщенных и ненасыщенных триглицеридов, алканов, алкенов, кетонов и спиртов. Они находят применение в косметической продукции благодаря высокой защитной способности и отсутствию рисков для здоровья, а также возможности регулирования вязкости средств [8]. Воски (пчелиный, карнаубский, канделильский и воск дерева ним) служат хорошей основой для натуральных кремов, бальзамов, помад, мазей и считаются оптимальными для разработки косметики.

Так, пчелиный воск состоит из эфиров (50–72 %), углеводородов (12–16 %), свободных жирных кислот (12–14 %), жирных спиртов (примерно 1 %) и экзогенных веществ, которые представляют собой остатки прополиса и пыльцы [9]. Он обладает противовоспалительными, ранозаживляющими, антиоксидантными, бактерицидными качествами

и эффективен в уходе за кожей при акне, атопическом дерматите, алопеции и псориазе [10].

Состав карнаубского воска – сложная смесь свободных жирных кислот (3–6 %), жирных спиртов (10–16 %), эфиров (более 80 %) и небольшого количества углеводородов (1–3 %) [11]. Такой воск поддерживает защитный барьер кожи, предохраняя её от трансэпидермальной потери влаги, и проявляет антиоксидантные свойства, помогая замедлить процессы старения кожи за счёт защиты от свободных радикалов.

В основе канделильского воска лежат углеводороды (около 50 %), сложные эфиры (20–29 %), свободные кислоты (7–9 %) и смолы (12–14 %) [12]. Ввиду некомедогенности он становится важным ингредиентом средств по уходу за разными типами кожи, включая проблемную, жирную и склонную к акне [12].

Воск дерева ним, обладая выраженной антисептической активностью, имеет широкий потенциал применения в препаратах для борьбы с экземой, псориазом, нейродермитом и крапивницей. Это достигается благодаря наличию терпеноидов (0,1–1 %), в частности азадирахтина, который используется в средствах для обработки ран, пролежней и порезов. Кроме него в составе воска дерева ним присутствуют полисахариды (10–30 %), флавоноиды (1–5 %), гликозиды (0,1–2 %) и алифатические соединения (20–50 %), которые характеризуются противовоспалительным, анальгезирующим и противоугревым действием [13].

Растительные масла

Растительные масла имеют в своём составе триглицериды, свободные жирные кислоты, фенольные соединения, стерины, фосфолипиды, воски, токоферолы и сквален, которые при местном применении по-разному влияют на физиологию кожи. Так, токоферолы и фенольные соединения проявляют антиоксидантный эффект и могут регулировать гомеостаз кожи; фосфолипиды усиливают кожный барьер и оказывают противовоспалительное действие [14]. Согласно исследованиям сделаны выводы о том, что растительные масла с высоким содержанием ненасыщенных жирных кислот, например олеиновой кислоты (оливковое масло, масло авокадо), способствуют повышенной проницаемости рогового слоя кожи, поражённой воспалением, в то время как масла с большим количеством линолевой кислоты (масло зародышей пшеницы, масло виноградных косточек) и насыщенных жирных кислот (масло какао, масло ши, кокосовое масло) содействуют быстрому заживлению ран [15].

Рассмотрим подробнее состав и свойства растительных масел, применяемых для изготовления косметических средств.

Масло кокоса содержит около 95 % насыщенных жирных кислот: лауриновой (50–80 %), миристиновой (10–27 %), пальмитиновой (8–10 %), каприловой и каприновой (2 %). Оно хорошо увлажняет и помогает защитить волосы от повреждений, эффективно борется с перхотью [16].

Масло амлы богато витамином С (около 6 %), включает терпены и флавоноиды (10–15 %), триглицериды олеиновой и линолевой кислот (50–70 %), свободные ненасыщенные жирные кислоты (10–20 %), дубильные вещества и танины (5–10 %), пигменты, эфирные масла, антиоксиданты [16]. Оно укрепляет корни и способствует росту волос, позволяет сохранить блеск и шелковистость.

Касторовое масло на 90–95 % состоит из триглицеридов рицинолевой кислоты. Кроме них в касторовом масле присутствуют ненасыщенные жирные кислоты: олеиновая (4–6 %) и линолевая (3–4 %); насыщенные жирные кислоты: пальмитиновая (1–2 %) и стеариновая (менее 1 %); воски и воскоподобные вещества (менее 1 %) [16]. Касторовое масло нашло применение в уходе за волосами и кожей головы, поскольку хорошо укрепляет волосяные фолликулы и уменьшает склонность к себорейному дерматиту.

Репейное масло широко используется в косметике для волос благодаря своим питательным и укрепляющим свойствам. Его химический состав включает триглицериды олеиновой, линолевой и стеариновой жирных кислот (80–90 %), полисахариды (1–2 %), витамины Е и А (0,1–0,3 %), фитостеролы (1–3 %), воски и дубильные вещества [17].

Масло ши состоит из триглицеридов олеиновой (40–50 %), стеариновой (20–30 %), линолевой (3–8 %) и пальмитиновой жирных кислот (4–8 %), а также тритерпенов, токоферола (витамин Е), фенолов и стеринов (до 1 %), которые обладают мощным противовоспалительным и антиоксидантным эффектом, а также улучшают эластичность кожи [15, 16].

Масло виноградных косточек содержит почти 98 % триглицеридов линолевой кислоты, однако именно наличие в составе небольшого количества фенольных соединений (0,2–0,5 %), токоферолов (0,1–0,3 %) и фитостеролов (1–2 %) обеспечивает быстрое заживление ран и антимикробную активность против патогенов [16].

Масло жожоба имеет значительную долю жирных кислот (около 99 %): эруковой (55–65 %), олеиновой (20–25 %), пальмитолеиновой (10–15 %), докозеновой (1–2 %) и феруловой (0,1–0,3 %). Кроме того, в нём присутствуют

токоферол (0,2–0,4 %) и фитостеролы, которые придают косметическим средствам увлажняющие и антивозрастные свойства [16].

Миндальное масло включает смесь глицеридов олеиновой (60–70 %), линолевой (20–30 %), пальмитиновой (5–10 %), миристиновой (1–2 %), пальмитолеиновой (1–2 %), стеариновой (1–3 %) кислот и остаточных количеств (менее 1 %) глицеридов линоленовой, арахидоновой, гадолеиновой, бегеновой и эруковой кислот, а также витамины группы В, токоферол, фитостеролы и фенольные соединения [15, 16]. Сочетание такого набора компонентов обуславливает смягчающее и противовоспалительное действие.

Масло амаранта является лидером по содержанию сквалена (2,4–8 %), на 77–83 % состоит из триглицеридов, на фосфолипиды приходится около 2,7–4,3 %, на эфиры стеролов – 3,1–6 %, на неомыляемые стеролы – 8,9–9,8 % [18]. Благодаря своему жирнокислотному составу оно обладает защитными свойствами и имеет широкий потенциал использования в косметических средствах.

Масло зародышей пшеницы богато биологически активным веществом октакозанолом (0,5–1 %), а также витамином Е (0,015–0,02 %), которые защищают кожу от повреждений свободными радикалами и замедляют процессы старения. Основной жирнокислотный состав представлен линолевой (55–60 %), олеиновой (20–25 %), пальмитиновой (около 10 %) и линоленовой (1–2 %) кислотами [19].

Оливковое масло содержит разнообразные химические компоненты, главные из которых – триглицериды (60–90 %), такие как триолеин, трипальмитин и трилинолеин. Присутствуют также моностеараты (0,2–0,5 %), сквален (0,5–1 %), токоферол (0,5–1 %), β-ситостерол (0,3–0,6 %). Особенностью оливкового масла является большое количество фенольных спиртов, кислот и флавоноидов. Их доля находится в пределах 0,1–0,3 %, что придаёт маслу антиоксидантные свойства и ускоряет восстановление повреждённых клеток кожи [15, 16].

Масло авокадо, жирнокислотный состав которого включает до 60 % олеиновой, до 25 % пальмитиновой, до 40 % линолевой кислот, сравнительно немного пальмитолеиновой кислоты, а также фитостеролы (0,2–0,3 %), токоферол (0,01–0,02 %) и сквален, широко используется в косметологии благодаря схожести с составом липидо-эпидермального барьера кожи человека. Применение масла авокадо в косметических средствах помогает восстановить защитные функции кожи, а также способствует регенерации клеток [15, 20].

Масло какао состоит из триглицеридов (98 %) стеариновой (80–90 %), олеиновой (5–10 %) и линолевой (1–3 %) кислот, а также из токоферола (0,2–0,5 %) и антиоксидантов (около 1 %) [21]. Благодаря богатому содержанию насыщенных и мононенасыщенных жиров масло какао отлично увлажняет сухую и повреждённую кожу.

Эфирные масла

Эфирные масла занимают важное место в косметической индустрии, поскольку проявляют уникальные ароматические и лечебные качества. Ранее были изучены составы и разработаны универсальные смеси эфирных масел, рекомендованные к применению в ЭКД, которые обладают терапевтическим действием в ароматерапии; ввиду разнообразия свойств они могут использоваться при производстве косметики [22]. С целью их включения в косметические продукты для профилактики симптомов, возникающих при микрогравитации, необходимо провести корректировки концентраций допустимых веществ согласно изменениям в ТР ТС 009/2011 [23].

На основе анализа данных [22, 23] для применения в натуральных косметических средствах предлагаются следующие композиции эфирных масел:

- эфирные масла лимона, розмарина, магнолии, корицы – стимулируют кровообращение, регулируют функции сальных желёз;
- эфирные масла кедра, апельсина – повышают тургор и обладают тонизирующим действием на кожу;
- эфирные масла лаванды, мяты – ускоряют заживление кожных ран, регенерируют кожу, снимают отёчность;
- эфирные масла шалфея, сандала, нероли – оказывают смягчающее и успокаивающее действие, способствуют разглаживанию кожи;
- эфирные масла чайного дерева, гвоздики, бергамота – содействуют сужению пор, имеют противовоспалительный эффект.

Таким образом, проанализировав составы и свойства восков, растительных и эфирных масел, можно сделать вывод о результативности и рациональности их применения при производстве натуральной косметики. Кроме того, все они представляют собой ингредиенты, которые могут быть получены из растительного материала, культивированного на территории ЭКД с использованием высокоэффективных современных технологий [24, 25]. Это благоприятно скажется на качестве компонентов, а также на характеристиках косметических продуктов. Оставшиеся после получения восков и масел отходы будут направлены на биопереработку с помощью микроорганизмов и включены в биогумус [26], что является экономически выгодным в условиях замкнутой экосистемы.

Разработка составов натуральных косметических средств

Подбор компонентов, предназначенных для косметических средств, осуществлялся согласно их свойствам с целью оптимальной сочетаемости и достижения максимального оздоровительного эффекта.

Натуральное косметическое средство для роста волос

Одним из основных факторов, ухудшающих структуру волос в условиях микрогравитации, является нарушение нормального кровообращения и обмена веществ [2]. Это может привести к недостаточному поступлению питательных элементов к волосяным фолликулам, что вызывает ослабление волос, их повышенное выпадение, а также различные дерматологические проблемы: себорейный дерматит, перхоть, экзему и др. Для минимизации таких последствий разработан состав, представленный в таблице 1.

Таблица 1 – Состав натурального косметического средства для роста волос

Компонент	Массовая доля, %
Воск канделильский	2
Воск карнаубский	3
Масло кокоса	50
Масло амлы	7
Масло касторовое	25
Масло репейное	10
Эфирное масло лимона	1
Эфирное масло розмарина	1
Эфирное масло магнолии	0,5
Эфирное масло корицы	0,5

Средство для роста волос включает воски, растительные и эфирные масла, имеющие ряд полезных качеств. Так, канделильский и карнаубский воски защищают волосы от внешних воздействий, придают блеск и гладкость. Масло кокоса глубоко проникает в волосы, предотвращая ломкость, масло амлы стимулирует рост и борется с выпадением, касторовое масло нормализует кровообращение, способствуя густоте, а репейное укрепляет и помогает от перхоти. Эфирное масло лимона очищает волосы, делает их блестящими, регулируя работу сальных желёз, а масло розмарина активирует рост и обладает антисептическими свойствами. Эфирные масла магнолии и корицы успокаивают кожу головы и улучшают кровообращение.

Натуральное косметическое средство для питания губ

Под воздействием микрогравитации замедляется регенерация тканей [2], снижается синтез коллагена и эластина, что ухудшает общее состояние и вызывает сухость кожи губ, делает её более уязвимой к трещинам и инфекциям. Для борьбы с этими симптомами разработано специальное уходовое средство, представленное в таблице 2.

Таблица 2 – Состав натурального косметического средства для питания губ

Компонент	Массовая доля, %
Воск канделильский	5
Воск пчелиный	3
Масло жожоба	20
Масло виноградных косточек	10
Масло ши	60
Эфирное масло кедра	1
Эфирное масло апельсина	1

Средство для питания губ обладает насыщенной натуральной формулой, обеспечивает глубокое увлажнение и защиту. В его составе присутствуют натуральные воски – канделильский и пчелиный, которые создают тонкую защитную плёнку, удерживают влагу и восстанавливают повреждённую кожу губ. Масло ши является мощным увлажнителем и регенерирующим компонентом, масло жожоба характеризуется смягчающими свойствами. Масло виноградных косточек богато антиоксидантами, защищает кожу от вредного влияния окружающей среды и содействует заживлению трещин. Эфирное масло кедра улучшает микроциркуляцию, имеет противовоспалительный эффект. Эфирное масло апельсина тонизирует и способствует активному восстановлению кожи губ.

Натуральное косметическое средство для укрепления ногтей

Снижение уровня гидратации организма и нарушение метаболизма оказывает существенное влияние на состояние ногтей. Это приводит к замедлению их роста, повышенной ломкости и расслаиванию. В таблице 3 приведён состав средства, предназначенного для устранения указанных симптомов.

Таблица 3 – Состав натурального косметического средства для укрепления ногтей

Компонент	Массовая доля, %
Воск канделильский	7
Воск карнаубский	4
Масло кокоса	55
Масло миндаля	20
Масло ши	13
Эфирное масло лаванды	0,5
Эфирное масло мяты	0,5

В основе средства для укрепления ногтей лежит достаточно большое количество восков – канделильского и карнаубского, которые укрепляют ногтевую пластину и предотвращают ломкость. Масло кокоса насыщает ногти необходимыми жирными кислотами, способствуя восстановлению. Масло миндаля делает ногти крепкими, защищает от расслаивания, а масло ши содействует регенерации ногтевой пластины. Эфирное масло лаванды стимулирует заживление повреждений в области ногтей, а эфирное масло мяты обладает охлаждающим и противовоспалительным эффектом.

Натуральное косметическое средство для сухой кожи

В условиях микрогравитации нарушается кро- и лимфообращение, что ухудшает доставку питательных веществ и кислорода к клеткам кожи, а также снижает активность сальных желёз, которые отвечают за выработку натуральных увлажняющих веществ и формирование защитных липидных слоёв кожи. В результате она становится более сухой, склонной к шелушению, трещинам и раздражениям. Для нивелирования этих симптомов рекомендуется использовать специальное косметическое средство, состав которого представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Состав натурального косметического средства для сухой кожи

Компонент	Массовая доля, %
Воск пчелиный	2
Воск карнаубский	5
Масло кокоса	55
Масло амаранта	15
Масло ши	10
Масло зародышей пшеницы	10
Эфирное масло шалфея	1
Эфирное масло сандала	1
Эфирное масло нероли	1

Незаменимыми компонентами средства для сухой кожи являются воски – пчелиный и карнаубский, которые создают защитную плёнку, удерживают влагу и способствуют нормализации гидролипидного барьера. Масло кокоса эффективно смягчает, увлажняет, насыщает кожу необходимыми жирными кислотами и повышает её эластичность. Масло амаранта стимулирует регенерацию повреждённых участков и защищает от свободных радикалов. Масло ши питает кожу, содействует её восстановлению. Масло зародышей пшеницы укрепляет кожный барьер. Эфирное масло шалфея помогает успокоить раздражённую кожу, эфирное масло сандала ускоряет заживление повреждений, а эфирное масло нероли придаёт коже здоровый и сияющий вид.

Натуральное косметическое средство против воспалений

Воздействие микрогравитации на развитие воспалительных процессов кожи связано с изменениями в иммунной системе и обменных процессах организма. В условиях микрогравитации уменьшается эффективность доставки иммунных клеток к повреждённым участкам, что затрудняет борьбу с воспалениями и замедляет процесс заживления. Кроме того, снижение общего тонуса тканей и уровня гидратации усиливает раздражение, становится причиной появления микротрещин и повышенной чувствительности кожи. Для устранения воспалительных процессов предназначено специально разработанное косметическое средство, состав которого представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Состав натурального косметического средства против воспалений

Компонент	Массовая доля, %
Воск дерева ним	7
Воск карнаубский	3
Воск канделильский	3
Масло оливковое	50
Масло авокадо	20
Масло какао	15
Эфирное масло чайного дерева	1
Эфирное масло гвоздики	0,5
Эфирное масло бергамота	0,5

Входящие в средство воски дерева ним, карнаубский и канделильский уменьшают раздражения, создают защитную плёнку и способствуют заживлению повреждённых участков кожи. Оливковое масло – мощный увлажнитель, оно также снижает воспаление и ускоряет регенерацию тканей. Масло авокадо укрепляет кожу, масло какао смягчает её. Эфирное масло чайного дерева имеет противовоспалительные свойства, эфирное масло гвоздики обладает антисептическим эффектом, а эфирное масло бергамота улучшает общее состояние кожи.

Заключение

На основании теоретического анализа влияния микрогравитации на человека сделан вывод о важности введения экологичных методов поддержания здоровья. С помощью комплексного подхода, включающего использование специально адаптированных под условия ЭКД экологичных ресурсов, разработаны пять натуральных косметических средств: для роста волос, питания губ, укрепления ногтей, а также для сухой кожи и против воспалений. Каждый из этих продуктов, в отличие от существующих косметических средств, содержит уникальную комбинацию ингредиентов, предназначенную для устранения проблем, вызванных воздействием пониженной гравитации. Кроме того, всё сырьё, применяемое для производства натуральной косметики, имеет растительное происхождение и может быть получено путём безотходной переработки выращенного на территории ЭКД экологически чистого материала.

В будущем планируется продолжение исследований в направлении создания природных многофункциональных косметических препаратов для использования в ЭКД: определение особенностей влияния различных факторов замкнутой системы ЭКД на организм человека и разработка средств, которые обеспечат людей всем необходимым для поддержания здоровья и красоты.

Список основных источников

1. *Юницкий, А.Э. Особенности проектирования жилого космического кластера «ЭкоКосмоДом» – миссия, цели, назначение / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 51–57.*
2. *Куклина, А.В. Особенности влияния микрогравитации на физиологическое и психологическое состояние человека / А.В. Куклина, М.С. Кухта // Эргодизайн. – 2023. – № 1 (19). – С. 62–68.*
3. *A Systematic Review of the Effects of Space and Simulated Microgravity on Dermatologic Conditions / K. Alexa, J.S. Arora, S.N. Sharma, A.N. Sharma // JAAD Reviews. – 2024. – Vol. 1. – P. 4–6.*
4. *Farkas, A. Effects of Spaceflight on Human Skin / A. Farkas, G. Farkas // Skin Pharmacology and Physiology. – 2021. – Vol. 34, iss. 5. – P. 239–245.*
5. *Simulated Microgravity Attenuates Skin Wound Healing by Inhibiting Dermal Fibroblast Migration Via F-Actin/YAP Signaling Pathway / Z. Yuhao, W. Lv, X. Peng [et al.] // Journal of Cellular Physiology. – 2023. – Vol. 238, iss. 12. – P. 2751–2764.*
6. *Уйба, В.В. Медико-биологические риски, связанные с выполнением дальних космических полётов / В.В. Уйба, И.Б. Ушаков, А.О. Сапецкий // Медицина экстремальных ситуаций. – 2017. – № 1 (59). – С. 43–64.*
7. *Катунина, Н.В. Формирование маркетинговой концепции натурального продукта на основании выявления трансформации ценностных ориентаций потребителей / Н.В. Катунина // Финансовые рынки и банки. – 2024. – № 3. – С. 11–15.*
8. *Mineral Oils and Waxes in Cosmetics: An Overview Mainly Based on the Current European Regulations and the Safety Profile of These Compounds / B. Chuberre, E. Araviiskaia, T. Bieber, A. Barbaud // Journal of the European Academy*

of Dermatology and Venereology. – 2019. – Vol. 33, suppl. 7. – P. 5–14.

9. *Beeswax: A Minireview of Its Antimicrobial Activity and Its Application in Medicine / F. Fratini, G. Cilia, B. Turchi, A. Felicioli // Asian Pacific Journal of Tropical Medicine. – 2016. – Vol. 9, iss. 9. – P. 839–843.*
10. *Пчелиный воск в лечении косметических дефектов и болезней / А.Б. Эдилбекова, К.С. Исакова, Э.Р. Раимбердиева, Ж.Д. Абдуллаева // Бюллетень науки и практики. – 2022. – Т. 8, № 3. – С. 274–278.*
11. *Tinto, W.F. Waxes / W.F. Tinto, T.O. Elufioye, J. Roach // Pharmacognosy: Fundamentals, Applications and Strategies / eds: S. Badal, R. Delgoda. – London [et al.], 2017. – Chap. 22. – P. 443–455.*
12. *Ekakitie, E. Euphorbia Cerifera Cera (Candelila) Emollient Properties, Uses and Effectiveness in Skincare Products / E. Ekakitie // Journal of Knowledge Learning and Science Technology. – 2024. – Vol. 3, iss. 3. – P. 225–234.*
13. *Wylie, M.R. The Antimicrobial Potential of the Neem Tree Azadirachta indica / M.R. Wylie, D.S. Merrell // Frontiers in Pharmacology. – 2022. – Vol. 13. – 891535.*
14. *Lin, T.-K. Anti-Inflammatory and Skin Barrier Repair Effects of Topical Application of Some Plant Oils / T.-K. Lin, L. Zhong, J.L. Santiago // International Journal of Molecular Sciences. – 2017. – Vol. 19, iss. 1. – 70.*
15. *Poljšak, N. Vegetable Butters and Oils as Therapeutically and Cosmetically Active Ingredients for Dermal Use: A Review of Clinical Studies / N. Poljšak, N. Kočevar Glavač // Frontiers in Pharmacology. – 2022. – Vol. 13. – 868461.*
16. *Bioactive-Based Cosmeceuticals: An Update on Emerging Trends / A. Goyal, A. Sharma, J. Kaur [et al.] // Molecules. – 2022. – Vol. 27, iss. 3. – 828.*
17. *Кароматов, И.Д. Лопух, репейник – перспективное растительное лекарственное средство (обзор литературы) / И.Д. Кароматов, Р.А. Нурмухамедова, М.Н. Бадриддинова // Биология и интегративная медицина. – 2017. – № 5. – С. 163–182.*
18. *Андрюхова, М.В. Перспективы использования масла амаранта в косметической и пищевой промышленности / М.В. Андрюхова, Е.В. Феськова, М.Ю. Мигель // Технология органических веществ: материалы докл. 84-й науч.-техн. конф., посвящ. 90-лет. юбилею БГТУ и Дню белорус. науки (с междунар. участием), Минск, 3–14 февр. 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. технолог. ун-т [и др.]; гл. ред. И.В. Войтов. – Минск, 2020. – С. 39–41.*
19. *Самойлова, Т.В. Биотехнологии глубокой переработки зерна пшеницы / Т.В. Самойлова, И.В. Горькова // Рациональное использование сырья и создание новых продуктов биотехнологического назначения: материалы междунар. науч.-практ. интернет-конф. по актуал. проблемам в обл. биотехнологии, Орёл, 30 окт. 2020 г. / М-во сельск. хоз-ва Рос. Федерации, Орлов. гос. аграр. ун-т им. Н.В. Парахина; отв. за вып. Н.Е. Павловская [и др.]. – Орёл, 2020. – С. 420–424.*
20. *Фомичева, Т.И. Масла авокадо и тыквы, как источники жирных кислот / Т.И. Фомичева, Е.В. Колужникова, П.И. Гунькова // Вестник Международной академии холода. – 2022. – № 2. – С. 56–60.*
21. *Анализ компонентного состава масла какао методом дифференциальной сканирующей калориметрии / С.А. Бредихин, В.Н. Андреев, А.П. Назарова, И.А. Короткий // Техника и технология пищевых производств. – 2024. – Т. 54, № 3. – С. 452–460.*
22. *Веремко, Е.В. Терапевтическое применение эфирных масел лекарственных трав в условиях ЭкоКосмоДома // Е.В. Веремко, А.В. Коледа // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 304–311.*
23. *О безопасности парфюмерно-косметической продукции: ТР ТС 009/2011: утв. решением Комис. Тамож. союза от 23 сент. 2011 г. № 799 // Стандарт качества. – URL: https://standartno.by/upload/pdf/tr-ts-009-2011-o-bezopasnosti-parfjumerno-kosmeticheskoi-produktsii.pdf (дата обращения: 25.05.2025).*
24. *Ferraz, L.P. Pulsed Electric Field-Assisted Extraction Techniques for Obtaining Vegetable Oils and Essential Oils: Recent Progress and Opportunities for the Food Industry / L.P. Ferraz, E.K. Silva // Separation and Purification Technology. – 2025. – Vol. 354, pt. 2. – 128833.*
25. *Fei, T. A Review of Recent Development of Sustainable Waxes Derived from Vegetable Oils / T. Fei, T. Wang // Current Opinion in Food Science. – 2017. – Vol. 16. – P. 7–14.*
26. *Биоутилизация органических остатков при помощи микроорганизмов / А.Э. Юницкий, Т.И. Пятакова, К.А. Бойко, И.В. Налетов // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 390–399.*

УДК 581.6:58.01/.07+629.7

Применение биополимеров для сохранения замкнутых экосистем биосферного типа

Т.Г. Третьякова

О.К. Шигалёва

А.Э. Баранкевич

ЗАО «Струнные технологии»,
г. Минск, Беларусь

В замкнутой и ограниченной по объёму экосистеме ЭкоКосмоДома (ЭКД) критически важным условием жизнеобеспечения является поддержание экологической устойчивости, которая достигается за счёт обязательной переработки ресурсов и отходов.

В статье описаны опыты по созданию биоразлагаемых полимеров из легкодоступных компонентов для обеспечения экологически чистой и устойчивой среды обитания, в том числе в ЭКД. Новые материалы рассматриваются как альтернатива традиционным полимерам и как возможность уменьшения экологического ущерба от пластиковых отходов.

Особое внимание уделено технологии производства упаковочных, конструктивных и перевязочных материалов (жидкий пластырь), предназначенных для использования в условиях замкнутых экосистем. Изучены способы получения и физические свойства полисахаридных плёнок на основе карбоксиметилцеллюлозы. Эксперименты показали, что сшивание полисахаридных молекул при помощи органических кислот представляет практический интерес для дальнейших разработок.

Результаты данного исследования полезны также для организации безотходного производства на Земле, поскольку использование биоразлагаемых и возобновляемых материалов открывает широкие перспективы для развития и внедрения инноваций в этой области.

Ключевые слова:
биодеградируемые полимеры, биополимер, жидкий пластырь, упаковочные материалы, ЭкоКосмоДом (ЭКД), экосистема.

UDC 581.6:58.01/.07+629.7

Use of Biopolymers for Preserving Closed Biosphere-Type Ecosystems

T. Tratsiakova

V. Shyhaliova

A. Barankevich

Unitsky String Technologies Inc., Minsk, Belarus

In the closed and confined ecosystem of the EcoCosmoHouse (ECH), maintaining environmental sustainability is a crucial condition for life support, that is achieved through the mandatory recycling of resources and waste.

The article outlines experiments focused on creating biodegradable polymers from easily accessible components, aiming to foster an environmentally friendly and sustainable living environment, including in the ECH. The new materials serve as alternatives to traditional polymers and as an opportunity to reduce the environmental impact of plastic waste.

The study highlights the technology for producing packaging, construction, and dressing materials (liquid plaster) for use in closed ecosystems. The paper reviews methods for obtaining polysaccharide films based on carboxymethylcellulose and examines their physical properties. The experiments show that cross-linking polysaccharide molecules with organic acids offers practical interest for future advancements.

The findings of this study are also valuable for organizing waste-free production on Earth, since the use of biodegradable and renewable materials offers promising opportunities for innovation and development in this field.

Keywords:
biodegradable polymers, biopolymer, EcoCosmoHouse (ECH), ecosystem, liquid bandage, packaging materials.

Введение

Все живые организмы на Земле образуют единую глобальную саморегулирующуюся экосистему, называемую биосферой, где каждый элемент играет свою роль в поддержании общего баланса.

Уже в прошлом веке стало очевидно, что активная деятельность человека наносит серьёзный ущерб биосфере и приводит к истощению природных запасов. Сохранение текущих тенденций развития технологий и объёма потребления будет причиной того, что к середине XXI в. уровень загрязнения окружающей среды и нехватки ресурсов достигнет катастрофических масштабов, ставя под угрозу существование человечества на Земле [1].

Здоровье планеты напрямую зависит от нашей способности контролировать и минимизировать негативные последствия, обусловленные увеличивающимся количеством отходов производства и жизнедеятельности. Важно не допускать попадания в природу опасных веществ (твёрдых, жидких, газообразных) и различных видов энергии (тепла, шума, излучения) в концентрациях, которые могут навредить людям, животным, растениям и в целом нарушить баланс в экосистемах.

Экологический ущерб от пластикового мусора становится всё более очевидным и вызывает растущую обеспокоенность. Обнаруженные в различных частях Мирового океана мусорные «острова», состоящие из дрейфующих на поверхности воды пластиковых частиц и микропластика, сопоставимы по размерам с площадью некоторых стран, что стало наглядным подтверждением масштаба надвигающейся катастрофы и причиной для тревоги (рисунки 1, 2) [2, 3].

Рисунок 1 – Мусорное пятно в Тихом океане [2]

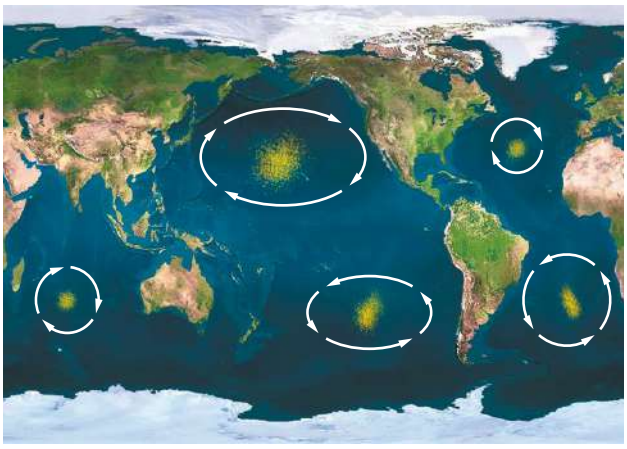


Рисунок 2 – Мусорные пятна в Мировом океане [3]

Ежегодно в Мировой океан попадает от 4,8 до 12,7 млн тонн пластиковых отходов [4]. Животные, рыбы, птицы и вся экосистема планеты становятся жертвами загрязнения пластиком, красками, маслами, пропитками и др. Микро- и нанопластик вместе с воздухом, едой и водой попадает в живой организм и не выводится, засоряя жабры, кровь и мышечную ткань. Как только пластик оказывается в морской пищевой цепи, он становится источником загрязнения и для человека (рисунок 3) [5].

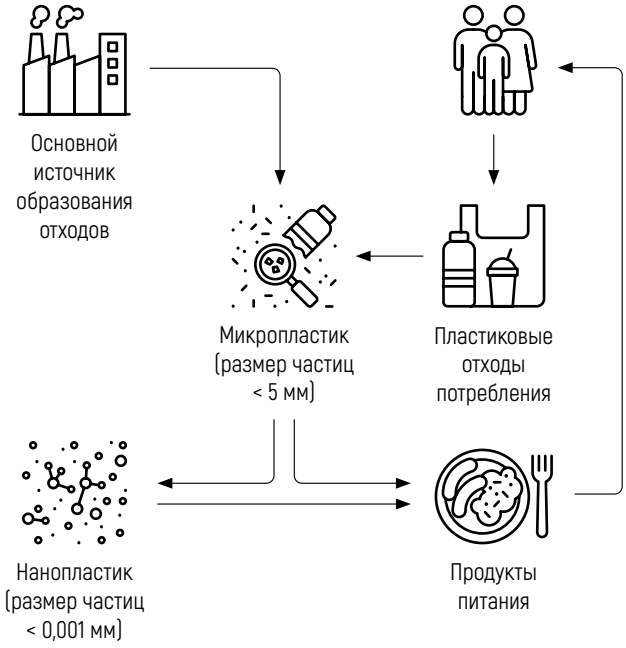


Рисунок 3 – Процесс попадания микро- и нанопластика в организм человека

Уже около полувека полимеры, полученные в основном из продуктов химической переработки нефти и газа, являются наиболее востребованным материалом для упаковки. Их популярность объясняется удобством, безопасностью и низкой стоимостью, что определяет дальнейшее увеличение объёмов производства таких материалов [6]. Изначально созданные для обеспечения высокой прочности и устойчивости к деградации под воздействием окружающей среды, данные полимеры в силу своих уникальных свойств получили широкое применение. Их прочность и устойчивость, считавшиеся преимуществом, обусловили накопление отходов, что превратило пластик в опасный фактор загрязнения живой природы, требующий внедрения инновационных технологий переработки и утилизации.

Несмотря на существующие методы утилизации полимерных отходов (рециклинг, сжигание, пиролиз и захоронение), ни один из них не является экологически безопасным решением. При сжигании таких материалов загрязняется воздух, захороненный пластик остаётся в почве на протяжении сотен лет, а его переработка часто неэффективна [7]. Вред, наносимый окружающей среде пластиковыми отходами, и активные попытки уменьшить их количество объясняют стремительный рост рынка биоразлагаемых полимеров.

Биополимеры имеют неоспоримые преимущества перед традиционным пластиком, поскольку их отличительная черта – сохранение потребительских свойств в течение всего срока эксплуатации, после чего под действием физических факторов и микробиологической активности они разрушаются в земле или воде до низкомолекулярных соединений, способных участвовать в круговороте веществ в биосфере. Это в значительной мере помогает решить проблемы с полимерным мусором. В большинстве случаев продуктами распада биополимеров являются углекислый газ, вода, минералы и биомасса [8]. Биоразлагаемые полимеры, которые изготавливаются из растений, обладают огромным потенциалом для использования в условиях замкнутой экосистемы, в том числе в ЭкоКосмоДоме (ЭКД) [9].

Мировые тенденции производства биополимеров характеризуются расширением сфер внедрения и усилением экологической и законодательной поддержки, что содействует постепенному замещению традиционных пластиков более безопасными и экологичными материалами. Биоразлагаемые полимеры находят применение в различных отраслях промышленности: пищевой, сельском хозяйстве, медицине, строительстве, автомобилестроении и косметологии. По оценкам специалистов, наблюдается стремительное развитие рынка биополимеров: его ежегодный прирост составляет около 22 %, что ведёт к значительному увеличению объёмов выпуска [10]. В 2022 г. мировое производство биопластика достигло 2,217 млн тонн, в 2024 г. – 2,874 млн тонн. Прогнозируется, что к 2027 г. данные мощности вырастут до 6,291 млн тонн, что свидетельствует о дальнейшем развитии этой отрасли [11].

Многие государства, преимущественно в Европе и Азии, стимулируют развитие и использование биоразлагаемых материалов, принимая соответствующие законы и предоставляя финансовую поддержку. Например, в Японии, которая демонстрирует один из самых высоких показателей роста потребления биополимеров, а также в европейских странах широко распространены биоразлагаемые пакеты и плёнки для сельского хозяйства и других отраслей. Наблюдаемая динамика рынка биоразлагаемых материалов во многом определяется государственной политикой в сфере охраны окружающей среды и повышением уровня общественного осознания негативных последствий загрязнения пластиком [12].

Биополимерная продукция применяется в различных сферах: медицине (перевязочные средства, гели, капсулы), производстве средств личной гигиены, одноразовой посуды и пеноматериалов, а также в изготовлении плёнок и пакетов, предназначенных для упаковки товаров, сельскохозяйственной продукции, мусора, и др. [13].

Существуют варианты классификации биоразлагаемых полимеров, один из которых представлен на рисунке 4 [14].

Кроме того, согласно нормативным документам плёнки из биоразлагаемого сырья разделяют по содержанию возобновляемого природного сырья, способу фрагментации, способу производства, а также по условиям компостирования. По содержанию возобновляемого природного сырья плёнки подразделяют на диапазоны: 20–40 %, 40–60 %, 60–80 %, 80–100 %. По способу фрагментации – на оксоразлагаемые и гидроразлагаемые. В зависимости от способа изготовления – на типы, получаемые в результате:

- механической или химической обработки природных полимеров – целлюлозы, крахмала, лигнина, коллагена, хитина;
- биотехнологического превращения возобновляемых источников сырья (полигидроксибутират, полигидроксивалерат и др.);
- химического синтеза полимеров из мономеров, получаемых биотехнологическим превращением возобновляемых источников сырья (полилактид);
- химического синтеза невозобновляемых источников сырья (поликапролактон, поливиниловый спирт);
- смешения биоразлагаемых полимерных материалов.

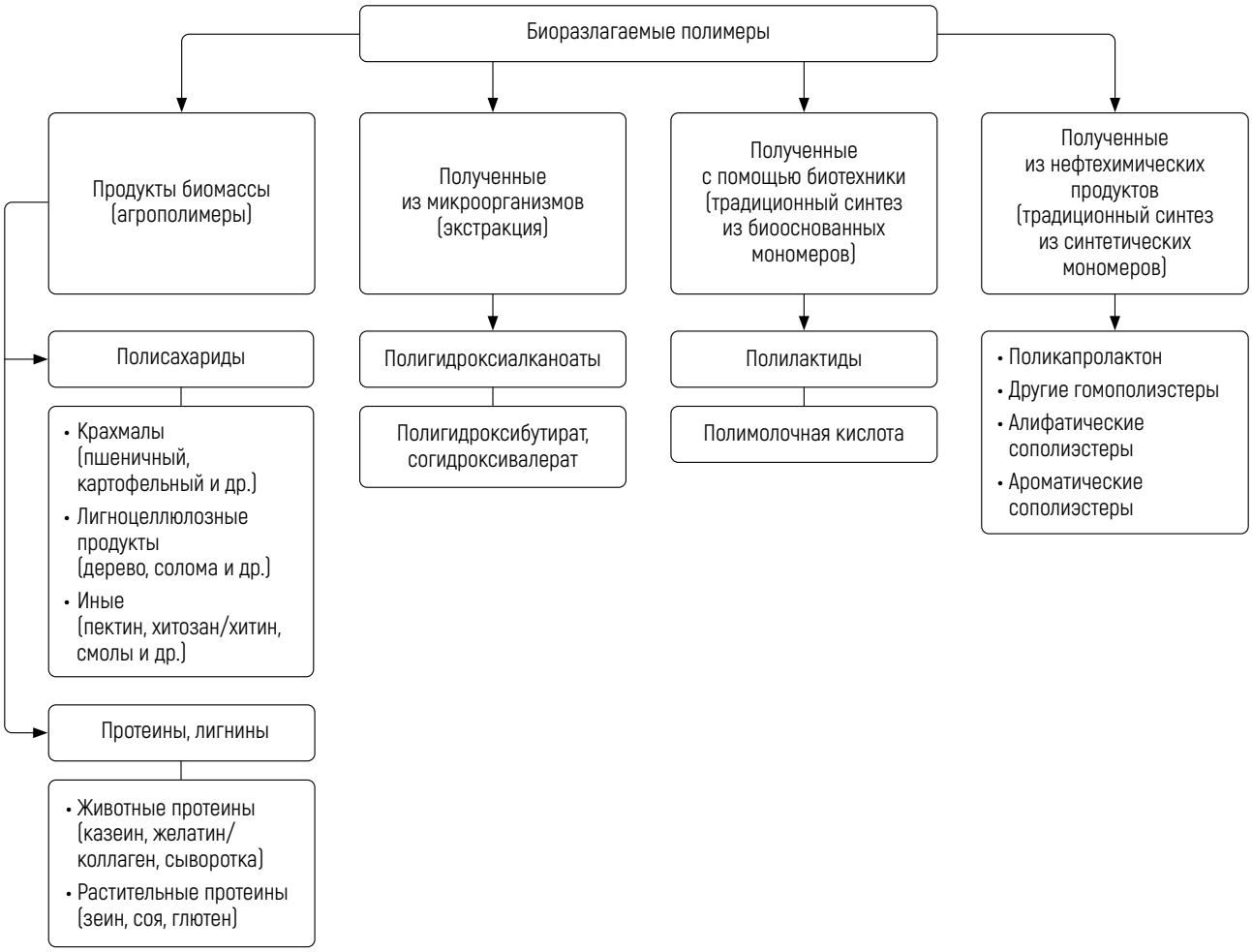


Рисунок 4 – Классификация биологически разлагаемых полимеров

В зависимости от условий разложения при переработке (компостировании) плёнки подразделяются на:

- пресноводные аэробные;
- морские аэробные;
- анаэробные;
- почвенные;
- промышленный компост;
- домашний компост.

В таблице 1 приведена информация о торговых марках и производителях биоразлагаемых полимерных материалов, созданных на основе природных полимеров [13].

Преимущества биополимерных материалов по сравнению с традиционными, полученными из ископаемого топлива:

- возобновляемость (изготавливаются из возобновляемых ресурсов);
- биоразлагаемость (разлагаются микроорганизмами и возвращаются в окружающую среду);
- более низкий углеродный след.

По мере развития технологий и снижения стоимости производства биополимеры становятся всё более привлекательной альтернативой традиционным полимерам.

Положительные аспекты применения биополимеров в жизни человека: создание биосовместимых медицинских устройств, имплантатов, лекарств, хирургических материалов и геля для заживления ран; изготовление упаковочных плёнок, волокон, искусственной кожи, съедобной упаковки для пищевых продуктов, тары для отходов; использование при очистке воды [13]. Биодеградируемые полимеры более экологичны и безопасны, поскольку способны полностью разлагаться, что уменьшает объём пластиковых отходов.

Таблица 1 – Обзор биоразлагаемых упаковочных материалов, производимых ведущими мировыми компаниями

Торговая марка	Фирма-изготовитель (страна)	Состав	Применение и свойства
Greensack	Convex Plastics (Италия)	Кукурузный (маисовый) крахмал	Обёртка для журналов, пищевая упаковка в индустрии fast food, упаковка для молока, пакеты-сумки
Biopac	Biologische Verpackungs-Systeme (Германия)	Пластифицированный крахмал (87–94 %)	Упаковка для хлебобулочных изделий, круп, яиц, сухих продовольственных продуктов
Bioceta	Tubize Plastiks (Бельгия)	Ацетат целлюлозы с пластификаторами и другими добавками	Упаковка для батареек к бытовым электроприборам, радиоприёмникам, фонарям
CelGreen	Daicel Chemical (Япония)	Ацетат целлюлозы, пропионат целлюлозы	Плёночный, этикеточный материал
Solanyl	Rodenburg Biopolymers (Нидерланды)	Отходы крахмала	Перерабатывается методом литьевого формования
Bioflex	Biotec (Германия)	Крахмал и пластификаторы (спирты, сахара, жиры, воски, алифатические полиэфиры)	Плёночный материал, разлагающийся в компосте при 30 °C за 56 суток с образованием продуктов, благоприятных для роста растений

Цель и задачи исследования

Цель работы – практическое применение методов создания биополимеров, полученных из легкодоступных биоразлагаемых компонентов, для обеспечения экологически чистой и устойчивой среды обитания, в том числе в ЭКД, а также оптимизация технологии производства упаковочных, конструктивных и перевязочных материалов (жидкого пластыря).

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

- выбор оптимального и легкодоступного сырья для получения биополимеров;
- освоение процесса изготовления биополимера.

Карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) – универсальный биополимер, полученный из натуральной целлюлозы, известный своими водорастворимыми и анионными характеристиками, что позволяет использовать его в качестве модификатора реологического действия, связующего и эмульгатора. КМЦ не токсична, представляет собой белый или слегка жёлтый порошок без запаха, вкуса [14]. Уникальные конструктивные особенности данного полимера делают его незаменимым для широкого применения в различных областях промышленности: пищевой (загуститель, стабилизатор), фармацевтической (связующее вещество в таблетках, загуститель в мазях, смазка в глазных каплях, компонент перевязочных материалов для ран), косметической (связующее, эмульгатор, загуститель), сельскохозяйственной (мульчирование, в составе оболочки для семян), строительной, текстильной, а также при изготовлении керамики, бумажной продукции и др.

Гелеобразующие свойства и способность КМЦ к формированию высоковязких растворов обусловлены особенностями её молекулярной структуры и присутствием карбоксиметильных функциональных групп. Отмечается высокая растворимость в водной среде в широком диапазоне температур с образованием прозрачных растворов. Биосовместимость и биодеградация КМЦ существенно увеличивают её ценность для создания экологически устойчивых материалов, поскольку их естественное разложение приводит к минимизации отходов.

Данный полимер получают путём карбоксиметилирования целлюлозы, которое обычно включает обработку целлюлозы хлоруксусной кислотой в щелочной среде (рисунок 5) [15].

В условиях ЭКД альтернативные и экологически чистые источники для изготовления целлюлозы представляют особый интерес. Например, в качестве потенциального сырья могут выступать такие растительные материалы, как трава, солома, ветки деревьев и отходы возобновляемых растительных материалов.

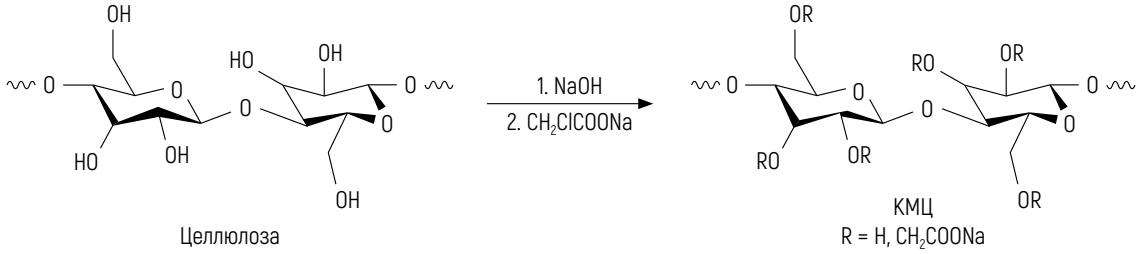


Рисунок 5 – Общая схема получения КМЦ

Внедрение принципов «зелёной» химии в производственный процесс позволяет синтезировать КМЦ без агрессивных растворителей, минимизировать химические отходы и использовать возобновляемое сырьё, что способствует снижению воздействия на окружающую среду [16].

Существует обширная патентная документация, описывающая внедрение биоразлагаемых полимеров в различных областях медицины.

Натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы (Na-КМЦ) известна как эмульгирующий, гелеобразующий и связывающий агент. Применяется в фармацевтике для оболочек таблеток, в глазных каплях, инъекционных растворах, в качестве стабилизатора и формообразователя в эмульсиях и мазях [17]. Эти разработки могут быть задействованы при создании новых лекарственных препаратов и защитных средств, включая жидкие пластыри [18].

Жидкий пластырь представляет собой полимерную дисперсию. После нанесения его на кожу и высыхания формируется тонкое, эластичное покрытие, которое эффективно защищает и способствует процессам регенерации небольших порезов, ран и ссадин.

Материалы и методы исследования

Для получения жидкого пластыря и биоразлагаемых плёнок использованы следующие материалы:

- натрий-карбоксиметилцеллюлоза марки 75 В (загуститель, относится к третьему классу опасности (умеренно опасное), не обладает токсическим действием, а также кумулятивной способностью (по ТУ 2231-034-79249837-2006);
- крахмал нативный кукурузный (по ГОСТ 32159-2013), картофельный (по ГОСТ 7699-78) и бобовый (гороховый) (по ГОСТ Р 70853-2023);
- желатин пищевой П-160 (по ГОСТ 11293-2017);
- поливиниловый спирт (по ГОСТ 10779-97);
- лимонная кислота (по ГОСТ 908-2004);
- янтарная кислота (по ГОСТ 6341-75);
- глицерин (по ГОСТ 6824-96);
- спирт этиловый (по ГОСТ 18300-87);
- экстракт алоэ лабораторного приготовления.

Экстракт алоэ готовили следующим образом: листья растения предварительно выдерживали при температуре 2–4 °С в течение 14 дней, затем измельчали и заливали дистиллированной водой в соотношении 1 : 3, после чего настаивали 1 ч и кипятили на водяной бане в течение получаса. Полученный экстракт отфильтровывали; данный фильтрат использовали в образце жидкого пластыря.

Для исследований применены толщиномер покрытий «Константа МК4» (ООО «КОНСТАНТА», Россия), универсальная испытательная машина Galdabini серии Quasar (Galdabini S.p.A., Италия). Перемешивание образцов осуществлялось на мешалке вертикальной верхнеприводной Stegler MV-6 (Stegler, Китай).

Результаты исследования

Выбор КМЦ обусловлен её способностью формировать качественные защитные легкосинтезируемые плёнки, в том числе на коже, в то время как крахмал и другие перечисленные выше материалы в ходе экспериментов не продемонстрировали подобного эффекта. В фармакологии КМЦ, известная как вспомогательный компонент, входит в состав препаратов наружного применения и парентерального введения. КМЦ и её производные разрешены к клиническому использованию в различных странах, включая Россию, США и страны Европы [19].

Получение биоразлагаемого пластыря

Для создания жидкого пластыря в воду вносили глицерин (3 %), КМЦ (9 %), а затем этиловый спирт (20 %) и перемешивали до однородного состояния в течение 30 мин. По достижении гомогенного состава добавляли экстракт

алоэ, перемешивали ещё 10 мин и для высыхания наносили на поверхность закрытой чашки Петри, в которой находилась вода, имеющая температуру (36 ± 2) °С (имитация температуры тела).

Поскольку КМЦ нерастворима в этиловом спирте, её предварительно растворяли в дистиллированной воде, а затем вводили спирт.

Экстракт алоэ добавлялся в состав исходя из заключения о быстром заживлении, основанного на результатах исследований, в которых изучалось репаративное действие алоэ на крысах [20]. Вместе с тем возможно производство жидкого пластыря, в рецептуру которого введены экстракты других лекарственных трав, обладающих ранозаживляющим свойством.

Полученный жидкий пластырь образовывал на поверхности кожи устойчивые защитные плёнки. Время, необходимое для полного высыхания, – от 5 до 7 мин в зависимости от толщины нанесённого слоя. После высыхания пластырь практически не виден на коже (рисунок 6). Плёнка не вызывала чувства стянутости, была гибкой и устойчивой к незначительному истиранию. Единственным выявленным недостатком оказалось отсутствие водостойкости, поэтому жидкий пластырь нужно обновлять после контакта с водой.

а) б)

Рисунок 6 – Жидкий пластырь:
а – сразу после нанесения;
б – после высыхания

Получение биоразлагаемой плёнки

Для получения биоразлагаемых плёнок в воду добавляли глицерин, модифицирующие компоненты (поликарбоновые кислоты) [21], КМЦ и до образования однородного состава перемешивали со скоростью 100 об/мин в течение 30 мин при температуре (20 ± 3) °С. Составы заливали в ёмкости и высушивали при температуре (30 ± 5) °С в течение 8 ч.

Предполагаемая химическая формула сшитого полимера с модифицирующей добавкой приведена на рисунке 7.

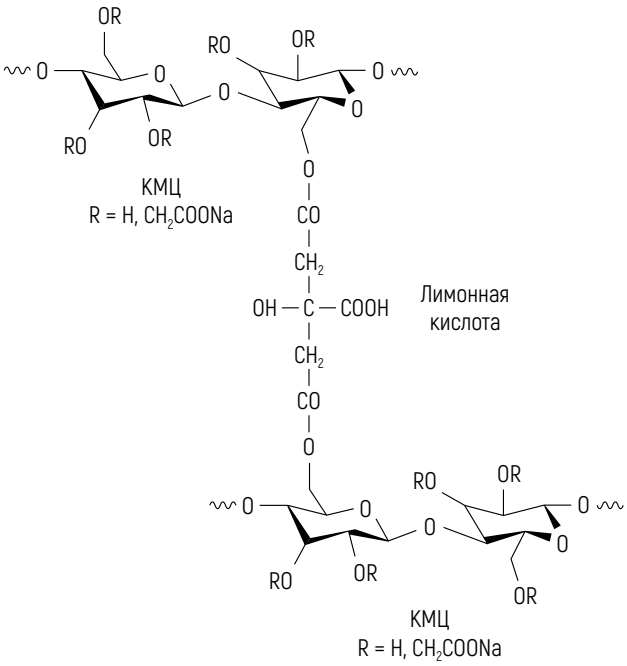


Рисунок 7 – Предполагаемая химическая формула сшитого биоразлагаемого полимера

Внешний вид полученных биоразлагаемых плёнок показан на рисунке 8.

Образец № 1 Образец № 2 Образец № 3

Рисунок 8 – Полученные образцы биоразлагаемых полимеров:
образец № 1 – без добавок;
образец № 2 – модифицированный лимонной кислотой;
образец № 3 – модифицированный янтарной кислотой

Плёнки проверялись при помощи толщиномера покрытий «Константа МК4». Прочностные характеристики определялись на универсальном оборудовании Galdabini серии Quasar, для чего плёнки разрезались на образцы прямоугольной формы (25 × 150 мм) и испытывались на растяжение при скорости 100 мм/мин (по ГОСТ 14236-81).

Прочность при растяжении σ_z (МПа (Н/мм^2)) вычисляли по формуле:

$$\sigma_z = \frac{F_{max}}{A_0},$$

где F_{max} – максимальная растягивающая нагрузка при испытании на растяжение, Н;

A_0 – начальное поперечное сечение образца, мм^2.

Относительное удлинение при разрыве ε_r (%):

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta l_{0r}}{l_0} \times 100\ \%,$$

где Δl_{0r} – изменение расчётной длины образца в момент разрыва, мм;

l_0 – начальная расчётная длина образца, мм.

Средние значения физико-механических показателей образцов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Средние значения физико-механических показателей образцов

Показатель	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
Нагрузка разрушения, Н	18,5	16,2	10,9
Деформация, мм	71,9	49,9	50
Прочность при растяжении, МПа (Н/мм^2)	3,1	1,93	1,2
Относительное удлинение при разрыве, %	71,9	49,9	50
Толщина полученной плёнки, мкм	235	337	352

Несмотря на то что прочность полученных образцов при растяжении ниже требуемых значений (по ГОСТ Р 57432-2017), их относительное удлинение во много раз превышает нормируемый показатель, что приближает данные биоразлагаемые плёнки к резиноподобным (полиуретановым) материалам, позволяет эффективно использовать их в качестве перевязочных материалов, для упаковки, в том числе вакуумной. Максимальное механическое растягивающее напряжение, с которым можно нагружать изделие, проявил образец № 1 (без модифицирующих добавок), как и максимальное относительное удлинение (таблица 2). Однако через шесть суток после тестирования образцов на воздействие воды стало очевидно, что образцы № 1 и 3 продемонстрировали существенное набухание и легко диспергировались при перемешивании. Образец № 2 оказался более устойчивым, сохраняя целостность до приложения значительного усилия, что говорит об успешном сшивании молекул и приобретении гидрофобных свойств (рисунок 9).

Образец № 1 Образец № 2 Образец № 3

Рисунок 9 – Образцы биоразлагаемых полимерных плёнок через шесть дней нахождения в воде

В связи с улучшенными характеристиками водостойкости, которые продемонстрировал образец № 2, целесообразно продолжить исследования, чтобы оценить воздействие различных поликарбоновых кислот на процесс сшивания молекул КМЦ. Кроме того, необходимо изучить, как температура и продолжительность обработки составов влияют на эффективность сшивания.

Заключение

В ходе лабораторных экспериментов, проведённых с различными материалами, установлено, что в условиях замкнутой экосистемы одним из вариантов доступного возобновляемого сырья для получения биоразлагаемых плёнок является КМЦ. На её основе разработан образец жидкого пластыря с экстрактом алоэ, а также образцы биоразлагаемых плёнок, которые обладают определёнными характеристиками, в том числе биоплёнка, продемонстрировавшая увеличенную стойкость к воде по сравнению с другими образцами. Физико-механические свойства плёнок позволяют использовать их в ЭКД в качестве защитных и упаковочных материалов. В дальнейшем для получения более стойких к воде экологичной упаковки и жидкого пластыря планируется ряд экспериментов по введению сополимеров и сшивающих агентов, а также изучение

основных свойств (газопроницаемость, химическая стойкость к этиловому спирту, кислотам и щелочам, токсическая безопасность) новых биодеградируемых полимеров. Кроме того, предполагаются опыты по производству КМЦ из продуктов растениеводства в соответствии с «зелёными» технологиями. Полученные результаты позволят продвинуться в изготовлении натуральных конструкционных материалов, которые можно использовать внутри кабин струнного транспорта, а также в ЭКД.

Биополимеры – перспективное направление для снижения загрязнения планеты и создания устойчивых замкнутых экосистем, в том числе в рамках программы «ЭкоМир» и технологической платформы «ЭкоКосмоДом».

Список основных источников

1. *Юницкий, А.Э. Программа «ЭкоМир» / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 24–77.*
2. *Лебедева, П. Как Большое мусорное пятно становится седьмым «континентом» планеты и что с этим делать / П. Лебедева // Экосфера. – URL: https://ecosphere.press/2024/09/23/kak-bolshoe-musornoe-pyatno-stanovitsya-sedmym-kontinentom-planety/. – Дата публ.: 23.09.2024.*
3. *Струа, А. Мировому океану грозит смерть / А. Струа // Литературная Россия. – URL: https://litrussia.su/2023/03/22/mirovomu-okeanu-grozit-smert/. – Дата публ.: 22.03.2023.*
4. *Ярославов, А.А. Жизненный цикл полимерного материала: проблемы и перспективы / А.А. Ярославов, М.С. Аржаков, А.Р. Хохлов // Вестник Российской академии наук. – 2022. – Т. 92, № 1. – С. 15–22.*
5. *Сергеев, О.Е. Обзор стратегий производства биопластиков как наиболее экологически устойчивой альтернативы традиционным пластикам / О.Е. Сергеев, К.А. Вельможина, Н.А. Политаева // Вестник Евразийской науки. – 2024. – Т. 16, № 1. – 32NZVN124.*
6. *Корзан, С.И. Обзор рынка экологичных упаковочных материалов для продуктов питания / С.И. Корзан // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2021. – Т. 14, № 2 (52). – С. 91–98.*
7. *Тер-Акопов, С.Г. Современное состояние, проблемы и тенденции развития отрасли производства биополимерных лигнинсодержащих материалов / С.Г. Тер-Акопов, А.А. Гусев, Д.В. Балыбин // Вестник ТГУ. – 2013. – Т. 15, вып. 5. – С. 2940–2945.*
8. *Утилизация упаковочных материалов как основа экологической безопасности: биоразлагаемые и съедобные материалы / И.Ю. Ухарцева, Е.А. Цветкова, В.А. Гольдаде, В.М. Шаповалов // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. – 2022 – Т. 12, № 1. – С. 74–89.*
9. *Технологические системы для культивирования растений в ЭкоКосмоДоме / А.Э. Юницкий, Н.С. Зыль, Д.А. Конёк, М.М. Парфенчик // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 336–346.*
10. *Литвяк, В.В. Перспективы производства современных упаковочных материалов с применением биоразлагаемых полимерных композиций / В.В. Литвяк // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. – 2019. – № 2. – С. 84–94.*
11. *Bioplastics Facts & Figures // European Bioplastics. – URL: https://www.european-bioplastics.org/bioplastics-facts-figures/ (date of access: 30.05.2025).*
12. *Хасанова, Г.Б. Биоразлагаемые полимеры – путь к устойчивому развитию природы и общества / Г.Б. Хасанова // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 18. – С. 323–325.*
13. *Крутько, Э.Т. Технология биоразлагаемых полимерных материалов: учеб.-метод. пособие / Э.Т. Крутько, Н.Р. Прокопчук, А.И. Глоба. – Минск: БГТУ, 2014. – 105 с.*
14. *Карпунин, И.И. Классификация биологически разлагаемых полимеров / И.И. Карпунин, В.В. Кузьмич, Т.Ф. Балабанова // Наука и техника. – 2015. – № 5. – С. 53–59.*
15. *Карбоксиметилцеллюлоза – идеальная основа для современных перевязочных материалов / Н.И. Василевич, А.И. Честков, К. Фэнг [и др.] // Лаборатория и производство. – 2025. – № 1 (31). – С. 62–70.*
16. *Получение гидратцеллюлозных волокон из растворов целлюлозы в ортофосфорной кислоте / Д.Д. Гриншпан, А.Н. Гончар, Т.А. Савицкая [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2014. – № 2. – С. 115–118.*

17. *Изучение физико-химических и технологических характеристик натрий карбоксиметилцеллюлозы с целью создания пролонгированных лекарственных форм с жидкой дисперсионной средой / Е.Т. Жилякова, Н.Н. Попов, М.Ю. Новикова [и др.] // Научные ведомости БелГУ. Серия: Медицина. Фармация. – 2011. – № 4 (99), вып. 13/2. – С. 146–153.*
18. *Патент RU 2629842C1, МПК A61L 17/10 (2006.01), A61L 31/04 (2006.01), A61L 31/14 (2006.01), A61P 41/00 (2006.01), C08J 5/18 (2006.01). Способ получения противоспаечного плёночного материала на основе карбоксиметилцеллюлозы: № 2016130854: заявлено 26.07.2016: опубл. 04.09.2017 / Жуковский В.А., Немилов В.Е., Жуковская И.И., Ахметшина О.З., Едомина Н.А., Кубин Н.Д.; заявитель ООО «Линтекс». – URL: https://patents.google.com/patent/RU2629841C1/ru (дата обращения: 10.06.2025).*
19. *Холтураев, Б.Ж. Гемостатические плёнки на основе карбоксиметилцеллюлозы / Б.Ж. Холтураев, А.А. Атаханов, А.А. Сарымсаков // Universum: химия и биология. – 2021. – № 9 (87). – С. 50–55.*
20. *Куличенко, Е.О. Исследование противовоспалительной активности сока алоэ вера / Е.О. Куличенко, Д.И. Поздняков, А.М. Темирбулатова // Вестник новых медицинских технологий. – 2023. – № 2. – С. 143–148.*
21. *Холназаров, Б.А. Синтез гидрогелей на основе биоматериалов крахмала и натрий-карбоксиметилцеллюлозы / Б.А. Холназаров, Х.Х. Тураев, Ю.Э. Назаров // Universum: химия и биология. – 2020. – № 10 (76). – С. 57–60.*

УДК 504.062+597+629.7

Биотехнология аквакультуры африканского клариевого сома в условиях замкнутой экосистемы

А.М. Павлюченко

М.М. Парфенчик

Е.А. Крюков

Е.В. Шерешовец

ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

Представлена биотехнология выращивания африканского клариевого сома, которая может быть внедрена в промышленное товарное рыбоводство. Широкие пределы выносливости, ценное мясо, быстрые темпы роста и возможность повторного применения всех побочных продуктов производства делают названный вид перспективным для разведения в ЭкоКосмоДоме (ЭКД), где особенно важно возвращать все использованные ресурсы в устойчивый биологический круговорот элементов.

Цель данной работы – практическое изучение эколого-физиологических особенностей клариевого сома для создания усовершенствованной биотехнологии его выращивания в условиях ЭКД. Проведено комплексное исследование по определению наиболее оптимальной среды содержания.

На основании полученных результатов предложены состав и параметры установок замкнутого водоснабжения, имеющих аквапонические модули, которые выступают в роли естественных биофильтров и источника дополнительной высококачественной растительной продукции. Представленная биотехнология на практике показала возможность производства ценной пищевой продукции при рациональном использовании ресурсов и минимизации экологических рисков, возникающих при интенсивной аквакультуре.

Ключевые слова:
аквакультура, аквапоника, африканский клариевый сом (Clarias gariepinus), замкнутая экосистема, установка замкнутого водоснабжения, ЭкоКосмоДом (ЭКД).

UDC 504.062+597+629.7

Biotechnology of African Sharptooth Catfish Aquaculture in a Closed Ecosystem

A. Pauliuchenka

M. Parfenchyk

Y. Krukau

A. Sharashovets

Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

This paper presents a biotechnology for the cultivation of African sharptooth catfish, which can be implemented in industrial fish farming. The species exhibits wide tolerance limits, valuable flesh, rapid growth rates, and at the same time there is an ability to recycle all by-products of production, making the proposed aquaculture model promising for the EcoCosmoHouse (ECH). Here, returning all utilized resources to a sustainable biological cycle is particularly important.

The aim of this work is to practically study the ecological and physiological characteristics of sharptooth catfish to develop an improved biotechnology for their cultivation within the ECH framework. A comprehensive research has been conducted to determine the optimal conditions for their environment.

Based on the obtained results, a proposal has been made regarding the composition and parameters of closed-loop water supply systems, which incorporate aquaponic modules that act as natural biofilters and sources of additional high-quality plant production. The presented biotechnology has demonstrated the feasibility of producing high-value food products while efficiently utilizing resources and minimizing the ecological risks associated with intensive aquaculture.

Keywords:
African sharptooth catfish (Clarias gariepinus), aquaculture, aquaponics, closed ecosystem, closed-loop water supply system, EcoCosmoHouse (ECH).

Введение

Африканский клариевый сом (*Clarias gariepinus*) – один из наиболее перспективных объектов промышленного рыбоводства. Данная тропическая рыба широко распространена в мире: встречается по всей Африке (включая водоёмы Сахары), в бассейне р. Иордан, в Южной Азии, на Мадагаскаре, Малайском архипелаге и Филиппинских островах. Этот вид является приоритетным для разведения в странах Африки, Ближнего Востока и Юго-Восточной Азии. Сомы населяют как постоянные, так и временные озёра и реки, пересыхающие в сухой сезон. Столь массовое распространение объясняется хорошим приспособлением к неблагоприятным для других рыб условиям, поэтому клариевых сомов выращивают не только в пределах естественного ареала, но и в регионах с умеренным климатом, а также в садках и бассейнах на тёплых водах промышленных объектов, в водных резервуарах ТЭЦ и АЭС, установках с замкнутым циклом водоснабжения. Представители *Clarias gariepinus* обладают хорошими адаптационными возможностями, могут жить в пресной, солоноватой воде, устойчивы к дефициту кислорода и повышенному количеству органических веществ в воде, рано созревают и способны размножаться в течение всего года, а товарной массы достигают на первом году выращивания [1].

Мясо сома имеет белый цвет, нежный и сочный вкус, является ценным источником витаминов, минералов и содержит практически полный набор жизненно важных микроэлементов (кальций, калий, натрий, фосфор, селен, марганец, железо, йод, хром и др.). Витаминный комплекс представлен ретинолом (А), тиамином (B_1), рибофлавином (B_2), ниацином (B_3), пантотеновой кислотой (B_5), пиридоксином (B_6), фолиевой кислотой (B_9), кобаламином (B_{12}), токоферолом (Е), аскорбиновой (С) и никотиновой (РР) кислотами. Благодаря присутствию триптофана, треонина, изолейцина, лейцина, лизина, метионина и цистина дневная норма животного белка удовлетворяется потреблением всего 200 г мяса клариевого сома. Это особенно значимо в условиях замкнутой экосистемы ЭкоКосмоДома (ЭКД), где ресурсы ограничены, в том числе пищевые.

Мясо сома характеризуется высокой питательностью и калорийностью, которые приравниваются к показателям рыб осетровых пород. Ввиду низкого содержания соединительной ткани (около 2 %; в говядине – более 8 %) оно легко усваивается. Как следствие, блюда из сома рекомендуются для диетического и детского рациона, а также для питания людей с малоподвижным образом жизни. Дополнительное преимущество – практическое отсутствие мелких костей и ярко выраженного рыбного запаха.

Кроме того, сом – практически безотходный продукт: в приготовлении пищи можно использовать все части рыбы. Выход филе достигает 50 %. Голова и хвост – основные ингредиенты для супов и ухи; мясо жарят, тушат, запекают, маринуют и готовят на гриле [2].

Мировое потребление рыбы на душу населения превышает 20 кг/год; в Беларуси данный показатель, включая мороженую, сушёную, солёную, копчёную рыбу и филе, а также консервы и пресервы из рыбы и морепродуктов, равен 13–16 кг/год (при медицинской норме от 16 до 24 кг), или 120 000–150 000 тонн ежегодно для всего населения [3]. В связи с этим в нашей стране имеется большая заинтересованность в развитии рыбной отрасли. Продукция белорусской аквакультуры представлена 15 видами рыб: 75,5 % составляет карп, на долю ценных видов (лососёвые, осетровые, сомовые) приходится менее 2 %, из них производство сомовых занимает всего 0,4 %.

Приведённые данные подтверждают целесообразность и экономические выгоды культивирования клариевого сома в Беларуси, а усовершенствованная биотехнология (при полном замыкании круговорота веществ) может быть использована в замкнутых экосистемах на Земле и в космосе.

Биологические особенности клариевого сома

Клариевый сом, или мраморный клариевый сом, или африканский сом, имеет гладкое, удлинённое, цилиндрическое, угревидной формы тело с длинными анальным и спинным плавниками, доходящими до хвостового (рисунок 1).

Рисунок 1 – Внешний вид клариевого сома

Чешуя на теле полностью отсутствует, а окрас туловища зависит от качества и цвета воды в месте обитания. Обычно наблюдается мраморный рисунок зеленоватых

и коричневых оттенков, при этом спина темнее, а брюшко значительно светлее. Тело клариевого сома обильно покрыто железами, выделяющими большое количество слизи, которая выполняет ряд защитных функций. Основная – препятствие пересыханию кожи во время миграции по суше. Существенна антибактерицидная роль слизи: она содержит группу ферментов, подавляющих развитие патогенной микрофлоры и ускоряющих заживление ран, которые могут быть получены во время миграции, при охоте или в борьбе за самку.

Клариевый сом отличается высокой степенью регенерации повреждённых частей тела: кожи, усов и плавников. Ампутированные усы взрослой особи отрастают полностью за 2–3 месяца; плавники, пострадавшие во время актов каннибализма, восстанавливаются в течение месяца. Травмированные участки сначала покрываются обильной слизью и приобретают красноватый оттенок, а через несколько месяцев рана заживает полностью, не оставляя рубцов. Некоторые африканские народы используют слизь сома в качестве медицинского препарата, обладающего антибактериальным и заживляющим действием.

Сом может долго существовать без воды. Этому способствует голая, обильно покрытая слизью кожа, облегчающая газообмен с воздухом, а также специальный орган дыхания – кларий, который представляет собой разветвлённые образования, расположенные на второй и четвёртой бронхиальных дугах. Кларий покрыт сильно васкуляризированной тканью, с её помощью рыба абсорбирует кислород из воздуха. Установлено, что наджаберный орган клариевого сома усваивает кислород из воздуха и наиболее эффективно функционирует при влажности 81 %. Воздушное дыхание позволяет рыбам в течение многих часов жить вне воды или в мутной воде, а также мигрировать по поверхности земли. Известны случаи, когда клариевые сомы переползали из одного водоёма в другой – на расстояния до 1,5 км. Миграции сомов в основном происходят в ночное время по причине максимальной влажности воздуха и отсутствия солнечного света, который пагубно влияет на слизистый покров.

В природе *Clarias gariepinus* питается водяными и наземными насекомыми, рыбами, моллюсками, высшей водной растительностью и фруктами. Можно считать его всеядной рыбой с выраженной склонностью к хищничеству.

Мясо клариевого сома – ценный продукт (16,6 % белка и всего 6,4 % липидов). Аминокислотный состав белков мышечной ткани характеризуется достаточно высоким содержанием незаменимых аминокислот – 49,4 %. В максимальном количестве имеются такие важные аминокислоты, как лейцин, лизин, фенилаланин, треонин, что свидетельствует о биологической ценности белков мышечной ткани клариевого сома (таблица 1). Сумма насыщенных жирных кислот достигает 33,96 %, при этом доминирующей кислотой является пальмитиновая – 22,73 %. Кроме того, липиды представлены мононенасыщенными жирными кислотами (45,18 %), основная масса из которых приходится на олеиновую, пальмитоолеиновую и эйкозаеновую кислоты (подобная особенность характерна для пресноводного рыбного сырья). Отмечается высокое (14,05 %) суммарное содержание биологически активных эссенциальных жирных кислот (линолевая, линоленовая, арахидоновая), что говорит о биологической ценности липидов этих рыб [4].

Таблица 1 – Аминокислотный состав белков мяса клариевого сома

Наименование	Содержание, г/100 г белка
Незаменимые аминокислоты	
Изолейцин	4,7
Лейцин	9,6
Лизин	10,2
Метионин + цистеин	3,2
Фенилаланин + тирозин	8,9
Треонин	4,6
Триптофан	1,1
Валин	5
Гистидин	2,1
Заменимые аминокислоты	
Аспарагиновая кислота	10,3
Глутаминовая кислота	16
Серин	4
Глицин	5,4
Аланин	6,4
Аргинин	6,9
Пролин	2,7

Исходя из перечисленных особенностей клариевого сома, можно сделать вывод о целесообразности его круглогодичного выращивания в установках замкнутого водоснабжения на Земле и в космосе [5].

Материалы и методы исследований

Для определения возможности промышленного выращивания клариевых сомов проведены комплексные лабораторные исследования данной аквакультуры.

В мае 2024 г. в пластиковый бассейн объёмом 100 л заселены 60 особей клариевых сомов массой по 50 г. Такое количество рыбы обусловлено тем, что максимальная плотность её выращивания составляет от 400 до 800 кг/м^3 [6, 7] (это позволит регулировать производство в максимально широком диапазоне в зависимости от нужд ЭКД). Бассейн оборудован воздушным компрессором мощностью 3 Вт (производительность 1,5 л/мин), обеспечивающим необходимую концентрацию кислорода (выше 3 мг/л) на всём протяжении исследования. Указанные требования объясняются биологическими особенностями сома, в частности способностью дышать атмосферным воздухом. Для повышения продуктивности установлен температурный режим с термопериодом 24 ч: в дневное время с 8 до 16 ч температуру повышали с 24 до 30 °С; с 16 до 8 ч понижали с 30 до 24 °С [8]. За изменения отвечали два независимых термостата с розеточными таймерами. Водородный показатель воды на протяжении исследования не выходил за пределы 6,5–8.

На темпы массонакопления сома влияют в основном температура, концентрация азотистых соединений и растворённого кислорода. Поскольку этот вид может дышать атмосферным воздухом и не так требователен к уровню кислорода в воде, а технологическое управление температурой воды легко реализуемо, то особое внимание уделено содержанию азотистых соединений. В случае их попадания в организм рыб через жаберный аппарат возникают функциональная анемия, метгемоглобинемия, гемическая и гистотоксическая гипоксия, приводящие к нарушению метаболизма, перекисному окислению липидов и ослаблению иммунитета. Однако за счёт малого размера жаберного аппарата и наличия клария у *Clarias gariepinus* данный фактор не имеет сильного негативного воздействия в отличие от других видов рыб. Летальная и угнетающая концентрация азотистых соединений индивидуальна при различных условиях (плотность популяции, температурный и кислородный режим, уровень pH и др.), тем не менее для стабильной жизнедеятельности нужно не превышать концентрации аммиака/аммония (не более 2–4 мг/л), нитритов (не более 0,1–0,2 мг/л) и нитратов (не более 60–80 мг/л). В настоящем исследовании контроль азотных соединений проводили один раз в неделю: все показатели находились на уровне установленной нормы, а максимальные значения аммиака/аммония, нитритов и нитратов наблюдались в самом конце эксперимента, что объясняется увеличением кормовых объёмов.

Водообмен в рыбоводных ёмкостях контролировался по уровню накопления метаболитов рыб. Для поддержания качества воды ежедневно выполнялись очистка механического фильтра и подмена воды (от 5 до 10 % – в прямой зависимости от возраста сомов).

Обычно себестоимость рыбы на 50 % зависит от затрат на искусственные комбикорма и поддержание заданного температурного режима [9]. Применение несбалансированных кормов снижает темпы роста и вызывает болезни алиментарного характера, что влияет на экономику предприятия и влечёт финансовые потери. Как показывают результаты многочисленных исследований, сомы демонстрируют достаточные темпы роста на всех комбикормах [10–12]. Однако для интенсивного выращивания товарной рыбы предпочтительно использовать корм (размер гранул 2–6 мм), содержащий минимум 40 % белка, 10–12 % жира, 35–40 % углеводов [13]. Необходимая кратность кормления молоди до 100 г – 8–12 раз в сутки, при выращивании рыб до массы 500 г – 3–4 раза, до 1000 г – два раза.

Качество корма является важным параметром, напрямую влияющим на жизнедеятельность сомов, химический состав побочных продуктов (отходов) производства и экономический аспект аквакультуры в целом.

Результаты исследований

Поскольку обеспечение ключевых параметров аквакультуры сравнительно легко регулируется технологическими методами, решено исследовать темпы роста сомов, используя различный состав кормов. Главное отличие подобранных кормов – содержание белка:

- рыбный комбикорм К-111-ЭП самый дешёвый; количество сырого протеина – не менее 20 %, сырого жира – не менее 2,5 %, сырой клетчатки – не более 9 %;
- комбикорм на основе личинок чёрной львинки характеризуется высоким содержанием белка (45–55 %) в сухом веществе и жиров (20–45 %), а также хитина (2–9 %);
- полуплавающий комбикорм Nutri Digest Alltech Coppens состоит из белка (50 %), жиров (18 %), клетчатки (0,8 %), фосфора (1,39 %) и др.

В рамках исследования сформированы три опытные группы по 10 особей, все сомы находились в одинаковых условиях (по плотности популяции, качеству воды, технологическому обеспечению и режиму кормления); взвешивание рыбы производилось два раза в месяц.

Комбикорм К-111-ЭП сомы поедали неохотно: в первую неделю исследований он почти целиком оказывался

несъеденным, в дальнейшем тоже оставалось большое количество (около 50 %), что отражалось на темпах роста (таблица 2) и уровне смертности сомов через месяц исследования. По этой причине эксперимент с комбикормом К-111-ЭП на данном этапе был прекращён.

Таблица 2 – Темпы роста клариевых сомов, питающихся комбикормом К-111-ЭП

Дата	Средняя масса, г	Прирост, г
03.06.2024	52,4 ± 0,9	–
17.06.2024	59,5 ± 1,1	7,1

Корм на основе личинок чёрной львинки и полуплавающий комбикорм Nutri Digest Alltech Coppens после периода адаптации (около недели) поедались полностью за 10 мин (таблица 3).

Таблица 3 – Темпы роста клариевых сомов, питающихся кормом на основе личинок чёрной львинки (1) и полуплавающим комбикормом Nutri Digest Alltech Coppens (2), в первой части эксперимента

Дата	Средняя масса, г		Прирост, г	
	1	2	1	2
03.06.2024	52,2 ± 0,7	51,5 ± 0,5	–	–
17.06.2024	61,3 ± 1,1	60,9 ± 0,9	9,1	9,4
08.07.2024	89,7 ± 1,3	87,3 ± 1,2	28,4	26,4
22.07.2024	113,9 ± 2,2	115,7 ± 2	24,4	28,4
05.08.2024	192,8 ± 11,6	195,2 ± 10,3	78,9	79,5
19.08.2024	244,7 ± 12,9	253,6 ± 11,6	51,9	58,4
09.09.2024	269 ± 14,5	271,4 ± 13,9	24,3	17,8
23.09.2024	319,2 ± 20,1	330,8 ± 19,7	50,2	59,4

Полученные данные отображают постоянный рост массы сомов (таблица 3). Тем не менее при анализе (рисунок 2) можно заметить некоторые колебания в скорости прироста их массы, что, скорее всего, объясняется малым возрастом рыб (не достигли половой зрелости).

Клариевые сомы с седьмого месяца жизни условно считаются половозрелыми (полноценно они формируются к 1,5–2 годам), к этому времени темпы роста выравниваются (таблица 4, рисунок 3).

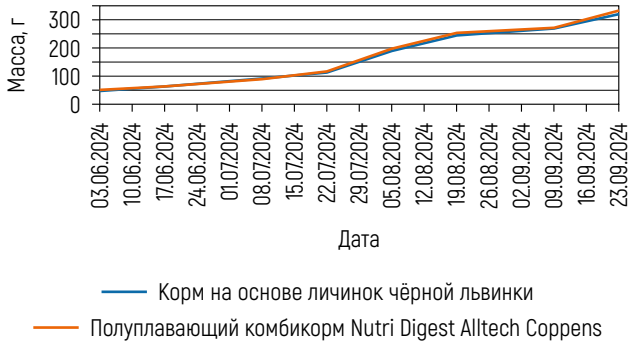


Рисунок 2 – Темпы роста клариевых сомов в первой части эксперимента

Таблица 4 – Темпы роста клариевых сомов, питающихся кормом на основе личинок чёрной львинки (1) и полуплавающим комбикормом Nutri Digest Alltech Coppens (2), во второй части эксперимента

Дата	Средняя масса, г		Прирост, г	
	1	2	1	2
07.10.2024	390 ± 26,7	399 ± 28,1	70,8	68,2
21.10.2024	412 ± 35	423 ± 37,1	22	24
04.11.2024	460 ± 39,1	471 ± 40,8	48	48
18.11.2024	530 ± 41,1	557 ± 43	70	86
09.12.2024	659 ± 45,9	667 ± 47,2	129	110
23.12.2024	740 ± 50,2	769 ± 53,7	81	102

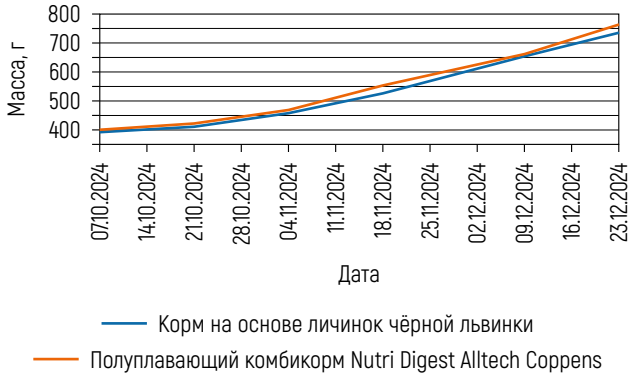


Рисунок 3 – Темпы роста клариевых сомов во второй части эксперимента

Поскольку в замкнутой экосистеме важны минимизация отходов и максимальное использование ресурсов, проведено дополнительное исследование, которое направлено

на вовлечение образующегося в результате жизнедеятельности рыб твёрдого осадка в биологический круговорот веществ. Даже при 99 % эффективности механического и биологического фильтров этого недостаточно для стабильного функционирования ЭКД, так как со временем накопление оставшегося 1 % незадействованных веществ способно нарушить устоявшийся баланс замкнутой экосистемы. Благодаря тому что твёрдый осадок представляет собой не полностью переработанный рыбами корм, богатый микроэлементами, его жидкая фракция может применяться в качестве биологической подкормки для растений.

Исследование включало в себя два варианта культивирования растений (в трёх повторностях каждый):

- на стандартном почвогрунте;
- на смеси почвогрунта (90 %) с жидкой фракцией отходов (10 %).

Салат, выращенный на стандартном почвогрунте (рисунок 4а), по сравнению с салатом, полученным на смешанном с осадком почвогрунте (рисунок 4б), имел меньшую площадь листовых пластин (58,7 и 75,3 см^2 соответственно) и почти вдвое меньшую биомассу (96,4 и 270,4 г соответственно).

а)

б)

Рисунок 4 – Салат, выращенный:
а – на стандартном почвогрунте;
б – на смешанном с осадком почвогрунте

На основании данных результатов можно сделать вывод, что в ходе исследования подобраны правильные условия выращивания клариевых сомов (за полгода набрана товарная масса) и оптимальный корм (содержание протеина не менее 45 %). Для масштабирования аквакультуры в условиях ЭКД необходимо использовать установку замкнутого водоснабжения (УЗВ).

Модель установки замкнутого водоснабжения для аквакультуры клариевого сома в условиях замкнутой экосистемы

УЗВ предоставляет возможность круглогодичного выращивания клариевых сомов вне зависимости от климатических условий. Культивирование рыбы проводится при многократном использовании одного и того же объёма воды, подвергаемой очистке и вновь возвращаемой в рыбоводные ёмкости. Таким образом существенно сокращается водопотребление. При задействовании УЗВ можно контролировать все параметры окружающей среды, делая их оптимальными для клариевого сома, а при применении богатых белком кормов рыбопродуктивность оценивается в 400–600 (в редких случаях до 800) кг/м^3 в год. Столь высокие результаты достигаются благодаря автоматизации УЗВ, качественным кормам и селекционно-племенной работе. Первичная стоимость производства и монтажа УЗВ является её недостатком, который компенсируется рядом преимуществ:

- полный контроль за всеми параметрами процесса выращивания;
- низкая вероятность возникновения заболеваний;
- минимальный расход воды;
- оптимальные условия для жизнедеятельности;
- отсутствие природных лимитирующих факторов;
- независимость производства от внешней среды;
- малые объёмы производственных площадей;
- экономия водных, земельных, энергетических ресурсов;
- невысокие трудозатраты (достаточно шести сотрудников для обслуживания УЗВ мощностью 100 тонн рыбы в год).

УЗВ, предлагаемая для замкнутой экосистемы, должна функционировать следующим образом. С помощью насосов в рыбоводные бассейны подаётся предварительно подготовленная вода. Загрязнённая остатками кормов и экскрементами рыб она направляется в механический фильтр, где очищается от твёрдых частиц и взвесей. Затем вода

попадает в биофильтр, в котором осуществляется её обработка и преобразование вредных для организма рыб соединений аммиака и нитритов в безопасные формы. Далее с помощью УФ-стерилизаторов и озонаторов вода обеззараживается и возвращается в бассейны с рыбой (рисунок 5).

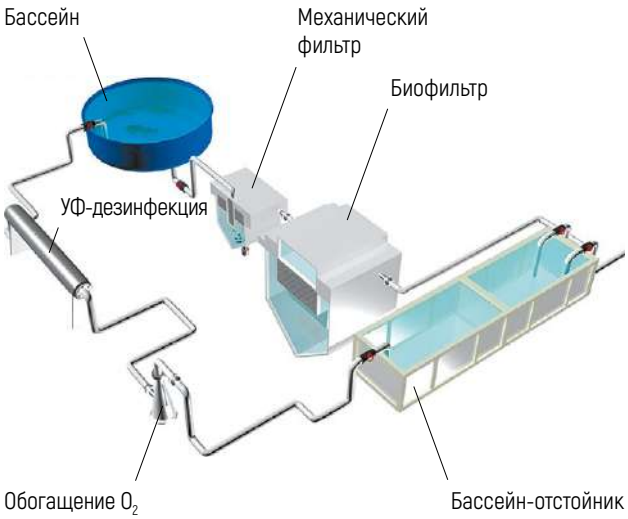


Рисунок 5 – Схема УЗВ для аквакультуры клариевого сома

Главное отличие УЗВ, предложенной для замкнутой экосистемы, заключается в дополнительном аквапоническом культивировании растений, а также в способе переработки отфильтрованных веществ.

Сом в процессе жизнедеятельности выделяет аммонийные, калийные и фосфорные соединения, которые в повышенных концентрациях становятся токсичными для рыб, однако являются ценным питательным материалом для растений. К тому же при совместном аквапоническом методе получения растительных культур (листовой салат, руккола, базилик, мята, петрушка, томаты, огурцы, перцы и др.) будет обеспечиваться дополнительная биологическая очистка и насыщение воды кислородом (рисунок 6).

Для реализации описанного производства необходимы следующие компоненты:

- бассейны (ёмкости), в которых выращивается рыба. Они должны быть круглой формы (для возможности кругового движения воды) и с конусным дном. Такая форма нижней поверхности нужна для удаления отходов рыб и несъеденного корма. Вода в ёмкости поступает сверху под углом для создания кругового движения (рисунок 7). Слив осуществляется самотёчным методом перелива;

Рисунок 6 – Аквапонический способ культивирования растений в УЗВ

Рисунок 7 – Рыбоводные бассейны аквапонической УЗВ

• аквапонические модули, состоящие из пластиковых лотков, в которых закреплены растения;

• механический барабанный фильтр – цилиндр-барабан, который обтянут мелкой сеткой с ячейками размером 100 мк. Фильтр на 1/3 наполняется водой, и по мере её очистки сетка забивается отходами, тем самым повышая уровень воды. При достижении нужной отметки заполнения автоматически включается промыв, при этом барабан начинает вращаться, а установленные сверху форсунки его очищают. Таким образом оставшийся после фильтрации растениями детрит удаляется из системы;

• биофильтр – место обитания бактерий. В воду загружаются пластиковые элементы с большим отношением площади поверхности к объёму. В них заселены бактерии: *Nitrosomonas* переводят аммиак в нитриты, *Nitrobacter* – нитриты в нитраты. Аммиак и нитриты в высокой концентрации являются токсичными для всех видов рыб, а уровень нитратов в аквапонике контролируется растениями;

• накопительный бак (сумматор). Предназначен для водосмешения, подлива свежей воды (при необходимости) и слива излишков. В эту ёмкость устанавливаются водонагреватели и насосы для подачи воды в систему;

• чистый кислород или генератор озона. Благодаря обогащению кислородом можно существенно увеличить количество рыбы в ёмкостях;

• УФ-дезинфекция. В связи с плотной посадкой рыбы имеется риск быстрого заражения друг от друга. УФ-лучи позволяют с этим бороться и значительно очищают воду.

Заключение

Клариевый сом благодаря своим биологическим особенностям является перспективной культурой для выращивания в УЗВ. Проведённое исследование практически показало, что сомы могут достигать товарной массы в течение полугода при соблюдении описанных технологических норм. Высокая продуктивность (400–800 кг/м^3), быстрые темпы роста (до 1 кг за шесть месяцев), получение ценного мяса, возможность безотходного использования и неприхотливость позволяют содержать сомов в условиях ЭКД.

Отличительная особенность предложенной биотехнологии – аквапоническое культивирование растений, что способствует биологической очистке воды и производству большего количества продукции на одной и той же площади. Данная разработка представляется важным шагом, обеспечивающим баланс между интенсивным производством и экологической безопасностью за счёт замкнутого цикла задействованных элементов.

Список основных источников

1. *Фаттолахи, М. Весовой и линейный рост африканского сома (Clarias gariepinus Burchell) в зависимости от факторов среды и качества корма: автореф. дис. … канд. с.-х. наук: 06.02.04 / Фаттолахи Мехрдад; Рос. гос. аграр. ун-т – МСХА им. К.А. Тимирязева. – М., 2006. – 23 с.*
2. *Клариевый сом – перспективный объект индустриального рыбоводства / В.В. Ярмош, Л.С. Цвирко, Е.В. Таразевич [и др.]. – Пинск: Полес. гос. ун-т, 2020. – 203 с.*
3. *Агеец, В.Ю. Экологические проблемы рыбоводства в Республике Беларусь и пути их решения / В.Ю. Агеец // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2015. – № 2. – С. 95–101.*
4. *Исследование биологической ценности и функционально-технологических свойств перспективных объектов аквакультуры / Р.В. Артемов, М.В. Арнаутов, А.В. Артемов, Е.С. Коноваленко // Рыбное хозяйство. – 2016. – № 1. – С. 74–77.*
5. *Юницкий, А.Э. Особенности проектирования жилого космического кластера «ЭкоКосмоДом» – миссия, цели, назначение / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 51–57.*
6. *Морфофизиологические адаптации африканского сома к высоким плотностям посадки в УЗВ / В.Н. Любомирова, Е.М. Романова, В.В. Романов, Д.А. Харитонов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 4 (52). – С. 140–147.*
7. *Власов, В.А. Воспроизводство и выращивание клариевого сома (Clarias gariepinus) в установках с замкнутым водообеспечением (УЗВ) / В.А. Власов // Рыбоводство и рыбное хозяйство. – 2012. – № 7. – С. 26–35.*
8. *Патент RU 2295239 C1, МПК A01K 61/00 (2006.01). Способ выращивания товарного клариевого сома: № 2005120310/12: заявлено 20.06.2005: опубл. 20.03.2007 / Серветник Г.Е., Наумова А.М., Чистова Л.С., Ковалев К.В., Власов В.А., Завьялов А.П., Дернаков В.В. – 6 с.*
9. *Власов, В.А. Использование пробиотика «Субтилис» в качестве добавки в комбикорм при выращивании*

клариевого сома (Clarias gariepinus) / В.А. Власов, Д.В. Артеменков, В.В. Панасенко // Рыбное хозяйство. – 2012. – №° 5. – С. 89–93.

10. *Власов, В. Какие комбикорма лучше усваивает клариевый сом / В. Власов // Комбикорма. – 2012. – №° 5. – С. 67–69.*
11. *Казакова, Л.Х. Обмен макроэлементов у клариевого сома Clarias gariepinus (Burchell, 1822) при разных источниках экзогенного кальция: дис. ... канд. биол. наук: 03.00.13 / Казакова Лейли Хыдыркулыевна; Рос. гос. аграр. ун-т – МСХА им. К.А. Тимирязева. – М., 2009. – 160 л.*
12. *Технологические аспекты выращивания африканского сома Clarias gariepinus в условиях замкнутого цикла водообеспечения / В.И. Филатов, Е.А. Мельченков, В.В. Приз, В.А. Слепнев // Рыбное хозяйство. – 2012. – №° 4. – С. 88–91.*
13. *Корма и кормление в аквакультуре: учебник / Е.И. Хрусталев, Т.М. Курапова, О.Е. Гончаренок, К.А Молчанова. – СПб.: Изд-во «Лань», 2017. – 388 с.: ил.*

Секция

СОЦИАЛЬНЫЕ, ПРАВОВЫЕ, ПОЛИТИЧЕСКИЕ И ФИНАНСОВЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ ЦИВИЛИЗАЦИИ НА ЗЕМЛЕ И В КОСМОСЕ

УДК 008.2+629.7

Социально-психологические обстоятельства реализации программы «ЭкоМир»: от общества потребления к обществу созидания

А.Э. Юницкий[1, 2]
доктор философии транспорта

Е.О. Петров[2]

[1] ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

[2] ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

Проанализированы социально-психологические обстоятельства, влияющие на перспективы реализации программы «ЭкоМир», ориентированной на переход от общества потребления к обществу созидания, в том числе в будущем за пределами планеты – в космическом пространстве, ближнем и дальнем. Актуальность темы обусловлена глобальными вызовами, связанными с загрязнением окружающей среды и исчерпанием природных ресурсов, что требует поиска новых моделей социального развития земной технократической (индустриальной, техногенной, инженерной) человеческой цивилизации. Цель исследования – определить механизмы формирования интересов, способные преобразовать общество в сторону устойчивого и гармоничного сосуществования с природой, в первую очередь с живой, т. е. с земной биосферой.

Проведён анализ влияния маркетинга, массовой культуры и образовательных стратегий на мотивацию личности. Рассмотрены культурные последствия доминирования потребительской парадигмы. В результате установлено, что современный социум утратил позитивный образ будущего и подвержен футурологическому пессимизму, что препятствует реализации его творческого потенциала.

Новизна исследования состоит в интеграции понятий интереса и творчества как ключевых факторов эволюции общественного устройства, а также в критическом осмыслении существующих демографических и образовательных стратегий. Предложен авторский взгляд на необходимость формирования новых интересов в качестве основы для построения ЭкоМира. Сделан вывод о том, что для обеспечения перехода к созидательному обществу и ускорению реализации программы «ЭкоМир», одна из задач которой – вынесение вредной земной промышленности в космос, требуется переосмысление целей образования, культуры и экономики.

Ключевые слова:
интерес, капитализм, потребление, творчество, экология, ЭкоМир, экономика.

UDC 008.2+629.7

Social and Psychological Circumstances of EcoSpace Program Implementation: From a Consumer Society to a Creative One

A. Unitsky[1, 2]
Dr. of Philosophy
in Information Technologies
(Transport)

E. Petrov[2]

[1] Astroengineering Technologies LLC,
Minsk, Belarus

[2] Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

The paper analyzes social and psychological circumstances affecting the prospects for implementing the EcoSpace program, which is aimed at transitioning from a consumer society to a creative society, including in the future beyond the planet, in near and deep space. The relevance of the topic is driven by global challenges related to environmental pollution and the depletion of natural resources, which requires the search for new models of social development for Earth's technocratic (industrial, technogenic, engineering) human civilization. The aim of the study is to identify the mechanisms of interest formation that can transform society towards sustainable and harmonious coexistence with nature, primarily with live nature, namely the Earth's biosphere.

An analysis of the influence of marketing, mass culture, and educational strategies on personal motivation was conducted. The cultural consequences of the dominance of the consumer paradigm were considered. As a result, it was established that modern society has lost its positive image of the future and is prone to futurological pessimism, which hinders the realization of its creative potential.

The novelty of the study lies in the integration of the concepts of interest and creativity as key factors in the evolution of social structure, as well as in the critical analysis of existing demographic and educational strategies. The authors offer their view on the need to form new interests as a basis for building EcoSpace. It is concluded that, in order to ensure the transition to a creative society and accelerate the implementation of the EcoSpace program – one of whose objectives is the relocation of environmentally harmful terrestrial industries into space – it is necessary to rethink the goals of education, culture, and the economy.

Keywords:
capitalism, consumption, creativity, ecology, economy, EcoSpace, interest.

Введение

«Экология» и «мир» – ключевые слова, определяющие диалектику программы «ЭкоМир» [1]. Экология (от др.-греч. οἶκος – жилище (дом), местопребывание и λόγος – слово, смысл, основание [2]) – учение о месте, в котором познающий живёт. Место пребывания и Вселенная, в которую оно погружено, неразрывно связаны.

Судьба человечества в том, чтобы обустраивать своё жилище. Люди покинули пещеры, возвели города, создали корабли, дороги и автомобили, самолёты и ракеты, тем самым расширив среду обитания до масштабов всей планеты и до робких посещений околоземного пространства. На каком-то этапе домом для людей должен стать и космос, ближний и дальний. Если этого не произойдёт, то жизнь земной человеческой цивилизации неизбежно прекратится в бесконечном пространстве и времени, хотя такие неинженерные цивилизации, как муравейники, пчелиные рои или стаи дельфинов, скорее всего, останутся на нашей планете. Случиться это может гораздо раньше, чем перестанет светить Солнце. Сделав мир экологически грязным, техногенная цивилизация, создавшая мёртвую техносферу внутри живой биосферы, захлебнётся в собственных технологических отходах. Тогда будет достигнут нейтралитет, но уже без человека [3].

Экологически нейтральный мир – это пространство и материя, в которых отсутствуют любые наполненные жизнью среды. Экологически загрязнённый мир засоряет окружающий объём чуждыми и не усваиваемыми живой материей отходами техноэкосистем. Таков мир XXI в. Задача людей – обустроить его и воздвигнуть экологически чистый мир, где установится гармония человеческого жилища (жилого и производственно-индустриального) и внешнего пространства.

Экологически чистый мир – это не только природная и технологическая среда обитания человека, но и качество его общения с другими. Часто окружающие значат гораздо больше, чем окружающее, в котором мы их встречаем. То, как и о чём говорят с нами, формирует состояние и мотивацию. Нет смысла лететь в космос и строить там заводы, если люди, с которыми мы собираемся отправиться в это путешествие, сделают нашу жизнь невыносимой. Более того, невозможно реализовать подобные планы без ощущения единства с другими, без общих интересов, потому что именно интересы являются главным определяющим человеческие взаимодействия основанием. Таким образом, создание ЭкоМира предполагает не только строительство новой инфраструктуры, новой геокосмической экономики, но и пробуждение в людях новых интересов. В конечном итоге – возникновение нового человека.

В связи с изложенным цель исследования – обозначить механизмы формирования интересов, способные направить общество в сторону устойчивого и гармоничного сосуществования с природой, в первую очередь с живой.

Футурологический пессимизм как доминирующая парадигма капиталистического общества

Понятие «интерес» проще объяснить через этимологию слова. Оно происходит от двух латинских корней *inter* (между) и *esse* (быть) и означает «находиться между, пролегать» [4]. Это особый, пограничный модус человеческого существования – бытие между. От чего-то оторвавшись, будучи к чему-то устремлённым, интересант как бы находится в подвешенном состоянии, он ещё не достиг желаемого, но уже вышел из зоны спокойствия. В то же время воля и мышление мобилизуются и подчиняют себе поведение субъекта. Следовательно, можно сказать, что интерес – это духовная форма потребности, выстраивающая соответствующее ей целеполагание.

Человек первой четверти XXI в., живущий в капиталистической, индустриальной, гиперурбанизированной, сверхинформированной среде, в своей массе движим интересами потребления – материального и информационного. При этом потребление – не цель, определяемая интересом, но форма его осуществления, противоположная другой основной форме – творчеству, созиданию. Такая ситуация не может быть использована в качестве условий строительства ЭкоМира. Потребление стимулирует производство. Производство – потребление. Их наращивание неизбежно связано с увеличением массы отходов и усилением загрязнения окружающей природной среды. Если ничего не изменить в данном отношении, то никакие чудеса техники не позволят построить экологически чистый мир. Наш общий с другими миллионами видов живых существ дом – биосфера планеты – будет всё грязнее, а после, вероятнее всего, станет для человечества экологически нейтральным. Простейшие выживут, а индустриальная цивилизация и человек как вид исчезнут.

Творчество и порождённое им созидание отличны от материальных благ и порождённого ими потребления тем, что в творчестве соединяются ранее разрозненные элементы реальности. В результате возникает то, чего не существовало, – произведения искусства, науки, инженерии.

Творчество надстраивается над потреблением и придаёт ему духовный смысл и цель. Потребление же не имеет цели сверх себя. Его цель – само потребление, не важно какое – материальное, информационное, нравственное или духовное. Социум, в котором господствует такая форма воплощения интереса, способен развиваться экстенсивно, количественно, но не интенсивно, качественно. Только творчески ориентированное общество совершит прорыв в ЭкоМир. Однако в настоящем никто и ничто не содействует установлению творчества как доминирующей формы реализации интереса. Можно утверждать, что происходит обратное.

Развитие психологии и технического вооружения средств массовой информации в XIX–XX вв. позволило маркетологам вести агрессивную и небывалую по масштабам работу по формированию и увеличению спроса на всевозможные товары и услуги. XX в. стал периодом расцвета рекламы, постепенно интегрированной, а иногда даже подчиняющей себе ранее самостоятельные сферы – науку, искусство, политику, демографию, образование, здравоохранение, нравственность, духовность и др. Призывы к потреблению идут через многочисленные каналы информации, из каждого утюга. Параллельно разрушается целеполагание творческого модуса интереса, так как цель потребления должна состоять в потреблении и ни в чём больше. Если допускается иное, то это означает ограничение продаж. Творчество всегда нуждается только в необходимом объёме ресурсов. Потребление стремится к избыточности и безграничности.

Разрушая творческое целеполагание, маркетинг неизбежно должен отсекать потребителя от будущего, упразднять картину будущего и, наоборот, ориентировать на ситуацию «здесь и сейчас». «После нас хоть потоп» – фундаментальная концепция общества потребления, сформулированная незадолго до его становления. Прогнозирующая функция творческого мышления, составляющая одну из отличительных особенностей человека как разумного существа, должна быть как минимум притуплена. Иначе потребитель откажется от большинства продуктов, как только он посмотрит на них с точки зрения вреда для своего здоровья и экологии (т. е. здоровья окружающей среды), на искусственно созданную маркетологами ограниченность срока службы, на патологическое навязывание так называемой высокой моды и на узость функционального назначения продуктов потребления.

Например, зачем (при ограниченном небольшом бюджете) покупать новый айфон или автомобиль по более дорогой цене, если это не окажет решающего влияния на продолжительность и качество работы оборудования по сравнению с аналогичным устройством, выпущенным несколько и даже десятки лет назад? Маркетологи скажут, что вы не будете нуждаться в обслуживании. Однако это ложь. Всё равно в том же автомобиле потребуется замена масла, фильтров, шин, а также мойка, чистка салона и др. О подобных расходах маркетологи умалчивают. Зато говорят, сколько хлопот будет иметь покупатель подержанного товара. Рисуют страшный, катастрофический образ будущего. Стараются испугать. И не случайно, ведь страх – более сильный стимул, чем ожидание поощрения. Самые действенные маркетинговые стратегии построены на страхе перед будущим, заставляя отвернуться от него. Будущего либо не существует, либо оно ужасно.

Пример с автомобилями при малом бюджете способен вызвать у некоторых отторжение, показаться неубедительным, поэтому стоит привести ещё несколько других. По сравнению с заведением, где можно поесть качественную еду, в ресторане быстрого питания дешевле, не нужно долго ждать. Здесь и сейчас потребитель насыщается, при этом платит меньше. Вероятные проблемы со здоровьем – смутная перспектива. Необходимость выложить за обед круглую сумму и, будучи голодным, ожидать заказа 30 мин и более – страх, который часто определяет выбор. Реклама зубной пасты строится на боязни кариеса. Продвижение продуктов, не содержащих сахара или ГМО, – на опасениях за здоровье в целом. Модные аксессуары привлекают не только статусностью, но и желанием не выглядеть в глазах окружающих неудачником. Вместе с тем будущее, предлагаемое рекламой, как правило, не распространяется на сколь-нибудь отдалённый срок, не намечает никаких перспектив роста, развития, а ограничивается обладанием и потреблением «здесь и сейчас». Возвращаясь к примеру с автомобилями, можно сказать в дополнение, что человек, принимающий решение о покупке новой машины, думает не столько о том, зачем и куда он на ней будет ездить, сколько о том, что он будет обладать и пользоваться ей, не сталкиваясь ни с какими проблемами. При этом любая поездка – сама по себе трудность, справиться с которой подержанный транспорт в хорошем состоянии способен не хуже.

Общество потребления – общество без положительного образа будущего. С одной стороны, потому что создание такого образа противоречит потреблению как форме осуществления интереса, лишённого долгосрочной позитивной цели. С другой – потому что анализ тенденций развития этого общества закономерно приводит к выводу о неизбежности катастроф, связанных с наращиванием

объёмов производства и, следовательно, загрязнением среды обитания.

Образ будущего, навязываемый обществом потребления, можно увидеть, например, в кинематографе, описывающем перспективы цивилизации. В списке самых кассовых научно-фантастических фильмов [5], где речь напрямую заходит о будущем землян, нет ни одной киноленты, в которой это будущее представлялось бы благополучным:

- «Интерстеллар» – неурожай и техногенные пыльные бури грозят гибелью всему человечеству;
- «Я – легенда» – смертельный вирус превращает города в пустыни, населённые монстрами, выходящими по ночам на охоту;
- «Первому игроку приготовиться» – люди, живущие в перенаселённых, грязных и бедных городах, бегут от реальности в более комфортный виртуальный мир;
- «Послезавтра» – население планеты уничтожают глобальные погодные катаклизмы;
- «Терминатор» – искусственный интеллект восстал против своих создателей и стремится уничтожить всё живое;
- «Планета обезьян» – приматы в результате проводимых над ними экспериментов стали умными и поработили человечество.

В этих фильмах визуализированы основные отрицательные сценарии – от медленной, но неукротимой деградации до быстрого конца в результате атомной войны, распространения вируса или резкого изменения климата. Такую же тенденцию к преобладанию негативных прогнозов можно увидеть в литературе и компьютерных играх. Тотальный футурологический пессимизм становится не только и не столько парадигмой осмысления перспектив развития, сколько инструментом программирования человечества на фатальный исход. Параллельно достигаются цели маркетологов, состоящие в укоренении и углублении потребления в качестве господствующей формы реализации интереса.

Воздействие на подсознание как механизм подавления творчества и стимулирования потребления

Маркетинговые кампании, реализуемые современным бизнесом, нацелены как на сознание человека, так и на структуру подсознания или бессознательного. Большая часть потребления стимулируется не рациональным выбором, а решениями, которые выглядят спонтанными и имеют своё основание в дорефлексивном слое психики. Специалисты в области поведенческой экономики Д. Канеман, Д. Ариэли, Р. Талер и К. Санстейн говорили, что причина, по которой мы откладываем похудение и занятия спортом, не уменьшаем количество потребления алкоголя, нарушаем правила, разговаривая по телефону во время вождения автомобиля, заключается в следующем: бессознательное берёт верх над разумным (логическим) началом. Интуитивное нередко отталкивает нас от совершения необходимых и полезных действий (меньше есть, больше тренироваться) в пользу сиюминутных удовольствий [6, 7].

Человек – единство трёх составляющих: сознания, подсознания и тела (организма). Организм материален. Сознание и подсознание – нет. Однако они находятся в материальном носителе. Уберите материальный носитель – они исчезнут. Точно так, как исчезает информация, записанная на флешку или магнитофонную плёнку, если их уничтожить.

С точки зрения инженерного анализа сложность устройства человеческого тела не может не потрясать. Исходным допущением подобного анализа выступает тезис: всё состоит из деталей. Самолёт, автомобиль, компьютер. И мы тоже. Если взять относительно простой структурный элемент нашего тела, т. е. молекулу ДНК, и рассмотреть её как инженерное сооружение, то деталями этой молекулы будут атомы – их количество превышает 100 млрд. Для сравнения: у самого современного широкофюзеляжного самолёта – всего лишь миллионы деталей. Значит, молекула ДНК сложнее самолёта минимум в тысячу раз, а с учётом связей – в миллион раз. Однако эта молекула – ещё не жизнь. Даже не вирус. Хотя про него трудно сказать, что он живой (жизнь начинается там, где появляются живые клетки организмов). Так вот, клетка сложнее молекулы ДНК в миллиард раз, если считать по количеству условных деталей и их связей [8].

Клетка производит молекулы ДНК. Она работает как завод, который изготавливает нечто в тысячи раз более сложное, чем самолёт, и в тысячи раз быстрее, чем самолётостроительные компании. Представьте, какие там должны быть условные наноцеха, станки, стапели, биореакторы, электростанции, дороги, коммуникации – транспортные, энергетические и информационные. Аналоги перечисленного действительно есть в клетке – на наноуровне. И это устройство с инженерной точки зрения сложнее в миллионы раз всего того, что создала инженерная цивилизация за миллион лет, отделяющий нас от первого рукотворного костра, который стал прародителем всех теплотехнических инженерных технологий – парового двигателя, двигателя внутреннего сгорания, газовой турбины и реактивного двигателя.

Приведём другой пример. Возьмём такие инженерные технологии, как электростанция или котельная. Там идёт лишь одна химическая реакция: топливо сгорает в кислороде и выделяет тепло, которое потом каким-то образом используется – для производства электричества, отопления домов и др. Однако в основе всего этого лежит одна химическая реакция, причём простейшая, – горение, т. е. разрушение сложных молекул до более простых. Кислород соединяется с тем, что горит. Неважно, что это: дрова, нефть, уголь или газ. Если здесь происходит только одна реакция, то в клетке – одномоментно свыше 10 000 сложнейших биохимических реакций, когда из простых молекул синтезируются более сложные, включая ДНК. При этом каждая такая реакция на много-много порядков сложнее горения. Значит, клетку лишь условно можно сравнивать с заводом: слишком мелко. Даже с промышленностью одной страны соотнести нельзя. Вероятно, корректно сравнить с индустрией в планетарных масштабах, но даже в данном случае работа клетки будет в миллионы раз сложнее.

Представим себе процесс управления цивилизацией или одной страной: сколько в ней чиновников, отраслей, школ, больниц, университетов, заводских администраций, полицейских и армейских подразделений и др. Однако по количеству связей и операций клетка сложнее всего перечисленного в миллиарды раз. Говорят, чтобы изложить на бумаге генетическую информацию, закодированную в одной молекуле ДНК, потребуются миллиарды листов. То есть будет издано столько книг, сколько их хранится в самой большой библиотеке мира. А для описания живой клетки не хватит бумаги, произведённой во всём мире.

Таких клеток, каждая из которых в миллионы раз сложнее любого государства, в нас содержится более 30 трлн. Они имеют своё назначение и функции – клетки мозга, сердца, желудка, печени, почек, красные кровяные тельца, стволовые клетки и др. Всем этим необходимо управлять – 30 трлн «цивилизаций» в каждое мгновение, в режиме 365/7/24/60/60, каждую секунду и минуту, днём и ночью, зимой и летом. Что же это за сила, которая способна выполнять такую сложную задачу? Её собирательное название – подсознание. В данном отношении подсознание – самое главное, что определяет жизнь человека.

Сознание – верхний уровень управления, орган, который отдаёт команды. Исполняет их подсознание. Иногда не исполняет, как бы заявляя, что не будет подчиняться, потому что руководствуется другой, записанной в подсознании, программой.

Можем ли мы по своей воле менять частоту сердцебиения, давление, работу почек, желудка, кишечника? По большому счёту, нам вообще неизвестно, как они функционируют. За управление ими отвечает подсознание.

В нём имеется генетическая информация, полученная за миллиарды лет эволюции жизни на планете и затем переданная в качестве записи по наследству в ДНК. Вместе с тем есть информация, которую человек приобретает с опытом в течение жизни. Организм начинает учиться, ещё находясь в утробе матери, и продолжает делать это до последнего удара сердца. Мы учимся ходить, говорить, играть на скрипке, ездить на велосипеде, готовить шашлыки и др. Сначала с помощью сознания – как не упасть, как крутить педали. При этом оно не командует мышечными волокнами, которых в нашем теле миллионы. К каждому мышечному волокну идёт нервное волокно. Надо вовремя, за доли секунды, подать управляющие импульсы и сократить волокна на строго заданную величину и в определённой последовательности. Когда мы широко и искренне улыбаемся, как говорят, от души, задействуется до 53 лицевых мышц. В нас 100 000 км кровеносных сосудов, включая капилляры. Каналы кровеносной системы имеют гладкие мышцы, куда также поступают нервные импульсы, поэтому могут сужаться (при холоде) и расширяться (при жаре) сосуды, повышаться или понижаться давление. В организме человека миллионы рецепторов, которые позволяют различать прикосновения, тепло, холод, боль, вкус, свет, звук, и каждый из них связан с подсознанием. Миллионами мышечных волокон и миллиардами гладкомышечных клеток управляют не только нервные сигналы, передающиеся через нервные клетки, но и вырабатываемые клетками гормоны (более 60), местные факторы и активность клеток-пейсмекеров. За это невообразимое разнообразие отвечает наше подсознание – оно и есть на самом деле то, что мы называем душой человека.

В подсознании записывается всё, что происходит в жизни: болезни, с которыми мы сталкиваемся, фильмы, которые мы смотрим, книги, которые читаем, ужасы, о которых мы узнаём из новостей – там сгорело, там взорвалось, там убили кого-то. Если проанализировать всю информацию, получаемую подсознанием изо дня в день, то кажется, что кто-то активно и целенаправленно работает с ним, программируя на негатив и разрушение.

Учитывая, что страх – гораздо более сильный стимул, чем обещание поощрения, и что средства рекламы и массовой информации направлены на подсознание, мы понимаем: эта определяющая поведение и интересы структура – тонкая и уязвимая – подвергается атаке с использованием преимущественно негативных смыслообразов. Утрируя, можно так описать состояние, в котором

оказывается психика потребителя, формируемая медиа: «жизнь коротка, а будущего нет – нужно ловить момент и брать от него как можно больше», что выражается в иррациональном стремлении достичь беспредельного потребления. Разумной стороной этого интереса оказывается задача получения кем-то (но не всеми) максимальной прибыли. Таким образом замыкается личностная проекция капиталистического мироустройства, вращающаяся в координатах «производство – потребление – прибыль». На уровне социального взаимодействия данный треугольник регламентируется как экономика. Вся система международных, внутригосударственных и корпоративных отношений оказывается экономоцентричной.

Необходимость перехода от экономоцентризма к экологоцентризму

Экономоцентризм – мировоззренческая установка, в которой решающая роль при объяснении важнейших сфер бытия отводится экономике, а также производным от неё феноменам. Данная установка отражает сугубо материальную ориентированность общественного и индивидуального сознания, предающую забвению культурные, духовно-нравственные, социально-межличностные принципы построения общественных отношений. Абсолютизация принципов экономоцентризма в пространстве научной теории способствует редукции целого ряда каузальных оснований, раскрывающих закономерности социально-экономического развития, к математически исчисляемым закономерностям, не учитывающим специфику той среды, которую они призваны описать.

На периферию теоретических построений выносятся представления о природно-географической неоднородности хозяйствующих систем, ментальных различиях субъектов хозяйственной деятельности, обусловленных данной неоднородностью, а также целый ряд других, не менее важных факторов этического, социального, политического порядка, без учёта которых невозможно создать полноценную экономическую теорию. Реализация принципов экономоцентризма крайне разрушительна для общества, выступает источником кризисных явлений [9].

Цель потребления – само потребление. По этой причине капитализм требует постоянного роста, что выглядит абсурдным. Ситуацию можно описать так: если сегодня я съел курицу массой 1 кг, то завтра должен съесть птицу, которая тяжелее на 100 г. Получается, через год я должен пообедать цыплёнком размером со слона. Гораздо разумнее было бы стремиться к закрытию базовых потребностей, а затем измерять развитие иными показателями, нежели, например, ВВП. Можно привязываться к количеству квадратных метров жилья на душу населения или к объёму потребляемой электроэнергии, но следует стремиться к тому, чтобы строительство и энергетика не убили природу. Значит, нужны другие технологии, дружественные биосфере – сложнейшей симбиотической сущности, насчитывающей миллионы видов живых организмов в количестве не менее чем септиллион особей [10].

Зачем привязываться к деньгам? Сегодня это такая же виртуальная реальность, как миры компьютерных игр. Золотой стандарт отменён в 1967 г. Доллары и иные валюты, грубо говоря, – просто разноцветные бумажки. Не только в этом, но и в остальном мы всё глубже уходим в виртуальность. Большую часть времени бодрствования люди сконцентрированы на смартфонах. Человек стал средством для зарабатывания. Движение к ЭкоМиру требует отвязки от доминирования подобных интересов; необходим переход от потребления к созиданию, от экономоцентризма к экологоцентризму.

Экономика – это понятие, а также раздел науки и сфера жизни, название которых включает в себя тот же корень, что и экология. «Эко-» – жилище, дом. В масштабах программы «ЭкоМир» таким домом выступает Вселенная – не только Земля, но и космос, ближний и дальний. Именно поэтому второй корень, образующий понятия «экономика» и «экология» и задающий смысл и основание соответствующего подхода, оказывается решающим.

«Номос» (др.-греч. νόμος) означает «закон». «Логос», как уже было сказано, – «слово» и «смысл». Эти термины похожи. Разница в их употреблении и интерпретации у философов сводится к масштабам применимости. «Номос» со времён софистов относится к местным, характерным для того или иного ограниченного сообщества, нормам, правилам, устоям. «Логос» с ещё более раннего периода, начиная с учения Гераклита, интерпретируется как смысл и универсальный закон, которому подчиняется Вселенная. Семантическая основа понятий «экономика» и «экология» предопределяет различие диктуемых с точки зрения соответствующих им парадигм мышления и действия. Экономика – ограниченный, экстенсивно ориентированный подход, принципиально не способный выйти за границы треугольника «производство – потребление – прибыль». Экология предполагает более высокий, экстенсивный уровень мышления и действия в соответствующих координатах «освоение – творчество – развитие». Этой же триадой характеризуется целеполагание, заложенное в программе «ЭкоМир».

Заключение

Необходимо изменить сформировавшуюся в капиталистическом обществе систему цивилизационных ценностей, перейти от интересов безудержного производства материальных благ и их потребления к интересам созидания и творчества – материального, духовного и нравственного. В рамках программы «ЭкоМир» это предполагается за счёт поэтапного внедрения ряда системообразующих и дружественных биосфере технологий (в сельском хозяйстве, градостроительстве, энергетике, транспорте – наземном и геокосмическом). С опорой на них вырастет новый тип социальной организации, в которой человек будет находиться в гармонии с природой. По мере масштабирования такого уклада жизни откроется путь в экологически чистый мир.

Однако задачи программы «ЭкоМир» едва ли могут базироваться на одних лишь технологиях. Нельзя ограничиваться инженерией и наукой. Требуется не только вести активную работу в сфере телесного и разумного, но и формировать соответствующие смыслообразы, способные позитивно воздействовать на подсознание каждого человека, а не, скажем, на 1 % наиболее продвинутых. Важно выстраивать и популяризировать позитивную картину будущего, прививать интерес творческого модуса отношения к реальности в массовом сознании и массовой культуре.

Кроме того, необходимо снимать фильмы и визуализировать Землю, люди которой осуществили масштабную экспансию в космос, обеспечив себя неисчерпаемыми источниками энергии, сырья, открыв доступ к безграничным пространственным и технологическим ресурсам, отсутствующим на планете, – глубокому вакууму, невесомости и технологической чистоте. Нельзя популяризировать тех «избранных», кто сбежал, например, на Марс, после того как человечество под их руководством окончательно загрязнило свой космический дом, свою цивилизационную колыбель, при этом максимально уничтожив всё живое в нём своим безудержным потреблением и разграблением всего и вся, до чего дотянулись руки капиталистов ради золотого тельца. Следует также писать художественные книги о человечестве, которое прекратило войны.

От экономоцентризма цивилизация должна перейти к экологоцентризму. Нужно сформировать новый тип политических систем, который условно можно назвать «экотехнократия».

Высшими интересами экотехнократии должны быть провозглашены интересы всей планеты и её живой части – биосферы как нашего общего космического дома, а техника призвана выступать не предметом потребления, а инструментом осуществления этих общецивилизационных интересов, конкретизируемых через бережное освоение доступных ресурсов, творческую самореализацию и непрерывное гармоничное развитие человечества в безграничной Вселенной. Тогда ЭкоМир, ставший целью и приобретший видимые очертания, может наступить гораздо быстрее.

Список основных источников

1. *Юницкий, А.Э. Программа «ЭкоМир» / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 24–77.*
2. *Логос // Большая российская энциклопедия. – URL: https://old.bigenc.ru/philosophy/text/2181697 (дата обращения: 06.06.2025).*
3. *Юницкий, А.Э. Цивилизационная ёмкость космического дома по имени Планета Земля / Анатолий Юницкий. – Минск, 2021. – 148 с.*
4. *Интерес // Викисловарь. – URL: https://ru.wiktionary.org/wiki/интерес#Этимология (дата обращения: 06.06.2025).*
5. *List of Highest-Grossing Science Fiction Films // Wikipedia. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_highest-rossing_science_fiction_films (date of access: 06.06.2025).*
6. *Бикбов, А. Мода на поведенческую экономику: чем живые люди отличаются от рациональных машин? / А. Бикбов // Реальное время. – URL: https://realnoevremya.ru/articles/59919-recenziyu-na-knigu-osnovatelya-povedencheskoy-ekonomiki-talera. – Дата публ.: 22.03.2017.*
7. *Роль сознания и бессознательного в экономическом поведении индивида и организации / Д.Д. Фролова, П.А. Александрова, Е.С. Кузнецова, Т.Ю. Королев // Научные исследования экономического факультета. Электронный журнал. – 2020. – Т. 12, вып. 2. – С. 54–77.*
8. *Юницкий, А.Э. Инженерия. Мир как инженерный проект / Анатолий Юницкий. – Минск: СтройМедиаПроект, 2023. – 320 с.*
9. *Семерник, С.З. Экономоцентризм как доминирующая мировоззренческая установка современного социума / С.З. Семерник // Сервис Plus. – 2014. – Т. 8, № 3. – С. 81–88.*
10. *Юницкий, А.Э. Инженер Мира: автобиография / Анатолий Юницкий. – Минск: СтройМедиаПроект, 2023. – 500 с.: ил.*

УДК 629.7.08+656.01

Обоснование поэтапного строительства взлётно-посадочной эстакады общепланетарного транспортного средства

А.Э. Юницкий[1, 2]
доктор философии транспорта

В.Н. Гаранин[2]
кандидат технических наук

А.А. Боровик[3]
кандидат технических наук

[1] ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

[2] ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

[3] Белорусский государственный экономический университет, г. Минск, Беларусь

Рассмотрен вопрос организации строительства взлётно-посадочной эстакады общепланетарного транспортного средства в рамках начала реализации программы uSpace.

Для ускорения процесса осуществления данной программы предложено применять поэтапный подход, при котором после завершения каждой стадии достигаются промежуточные результаты и извлекаются выгоды. В частности, показано, что первым шагом должно стать сооружение жилых опор, главным образом на островах Индонезии. Представлена расчётная информация о количестве людей, которые смогут разместиться в таких зданиях.

Обозначены обобщённые и более детальные этапы создания элементов геокосмического транспортно-инфраструктурного комплекса, позволяющие эффективно решать различные проблемы возведения объекта и формировать механизмы стимулирования для выделения ресурсов на строительство на разных стадиях со стороны развивающихся и развитых стран мира, а также частных инвесторов.

Ключевые слова:
взлётно-посадочный комплекс, общепланетарное транспортное средство (ОТС), опора, старт строительства, трансконтинентальные перевозки, этапность, uSpace.

UDC 629.7.08+656.01

Rationale for Phased Construction of General Planetary Vehicle Takeoff and Landing Overpass

A. Unitsky [1, 2]
Dr. of Philosophy
in Information Technologies
(Transport)

V. Garanin [2]
Ph.D. in Engineering Sciences

A. Borovik [3]
Ph.D. in Engineering Sciences

[1] Astroengineering Technologies LLC, Minsk, Belarus

[2] Unitsky String Technologies Inc., Minsk, Belarus

[3] Belarus State Economic University, Minsk, Belarus

The paper considers the organization of constructing a General Planetary Vehicle takeoff and landing overpass within the framework of the uSpace program's initiation.

To expedite the implementation of this project, a phased approach is proposed, allowing for the achievement of intermediate results and the realization of benefits after the completion of each stage. In particular, it is shown that the first step should be the construction of residential supports, primarily located on the islands of Indonesia. Detailed estimates regarding the capacity of these structures to accommodate residents are provided.

The article outlines both generalized and specific stages for the development of elements within a geocosmic transport and infrastructure complex. This facilitates the effective resolution of various construction challenges while establishing incentive mechanisms for resource allocation at different stages from both developing and developed countries, as well as private investors.

Keywords:
General Planetary Vehicle (GPV), phasing, start of construction, support structure, takeoff and landing complex, transcontinental transportation, uSpace.

Введение

Стартовая эстакада общепланетарного транспортного средства (uWay), или взлётно-посадочный комплекс (ВПК), – это инженерный объект планетарного масштаба протяжённостью 40 076 км [1], при возведении которого следует учитывать опыт реализации различных крупных сооружений на Земле. Практика в данной сфере показывает необходимость решения ряда проблем, не связанных непосредственно с используемыми технологиями, – экологических, политических, финансовых и других, которые нередко сдерживают запуск процессов строительства многих объектов.

Обращая внимание на опыт осуществления таких масштабных проектов, как Панамский и Суэцкий каналы [2], Байкало-Амурская магистраль [3], Крымский мост [4], можно утверждать, что решающими факторами всегда выступают геополитические. Кроме того, в настоящее время усиливается влияние экономических условий, требующих концентрации значительных ресурсов до срока окупаемости. При этом нужно также учитывать синтез политических и экономических связей современной цивилизации.

Отсюда следует вывод, что и при возведении uWay непременно будут возникать различные проблемы – политические, геополитические, финансовые, технологические, экологические и др. Очевидно, что для успешного продвижения проекта не должно быть явных противников его воплощения либо последствия их действий должны быть сведены к минимуму. К таким противникам можно отнести террористов, крупные государства, способные заблокировать реализацию данной концепции из-за геополитического соперничества, а также лоббистов ракетной доставки грузов в космос. По этим причинам актуальным является вопрос привлечения сторонников проекта путём нахождения мотиваций для широкого круга инвесторов и политиков.

Таким образом, цель работы – создать стратегию строительства общепланетарного геокосмического транспортно-инфраструктурного комплекса, включающую определение основных этапов возведения uWay и общепланетарного транспортного средства (ОТС), а также способствующую стимулированию выделения необходимых для этого ресурсов.

Актуальность и суть проблемы

В настоящее время, для того чтобы внедрить общепланетарный транспорт в цивилизационную жизнь на планете Земля, большое внимание уделяется решению технических проблем, связанных с энергетикой [5, 6], безопасностью [7], экологией [8] и др. Указанные исследования нацелены в основном на перспективу и во многих случаях опираются на технологии, которые ещё предстоит разработать и опробовать на практике [9]. Данный подход у некоторых учёных может вызывать сомнение в реальности осуществления такого масштабного проекта, как строительство uWay. В противовес скептикам целесообразно возводить объект одновременно с его разработкой. Однако здесь требуется чёткая стратегия строительства – общая концепция, позволяющая довести создание uWay до завершения. Возникает главный вопрос: как приступить к началу сооружения рассматриваемой эстакады без полноценной разработки? Такой опыт имеется лишь при реализации относительно небольших проектов (космические миссии [10], программное обеспечение [11] и др.). Для столь масштабного проекта, как общепланетарный геокосмический транспорт, невозможно использовать сторонние практические результаты, поскольку в данном случае требуются гораздо большие ресурсы, а значит, возникают риски совсем другого порядка.

Предлагаемое решение для ускорения запуска строительства uWay

В сегодняшнем мире потребления основной мотивацией к строительству крупных объектов выступает максимально быстрое получение прибыли. В связи с этим решение проблемы скорейшего запуска программы uSpace видится в первую очередь в получении прибыли на промежуточных этапах строительства uWay и ОТС.

На основании проработанной общей концепции возведения uWay [12, 13] предлагается сделать акцент на четырёх стадиях (по функциональному признаку), которые в дальнейшем можно разделить на более детальные этапы (рисунок 1).

Таким образом, для ускорения создания общепланетарного транспорта в рамках реализации программы uSpace предлагается обеспечить разделение процесса на стадии, каждая из которых приносит самостоятельные результаты и выгоды. Приступив к строительству и вложив средства на каком-либо этапе, инвесторы будут иметь стимулы продолжить финансирование, получая прибыль на промежуточных стадиях, т. е. ещё до начала эксплуатации uWay, когда станет возможным выведение грузов на экваториальные орбиты.

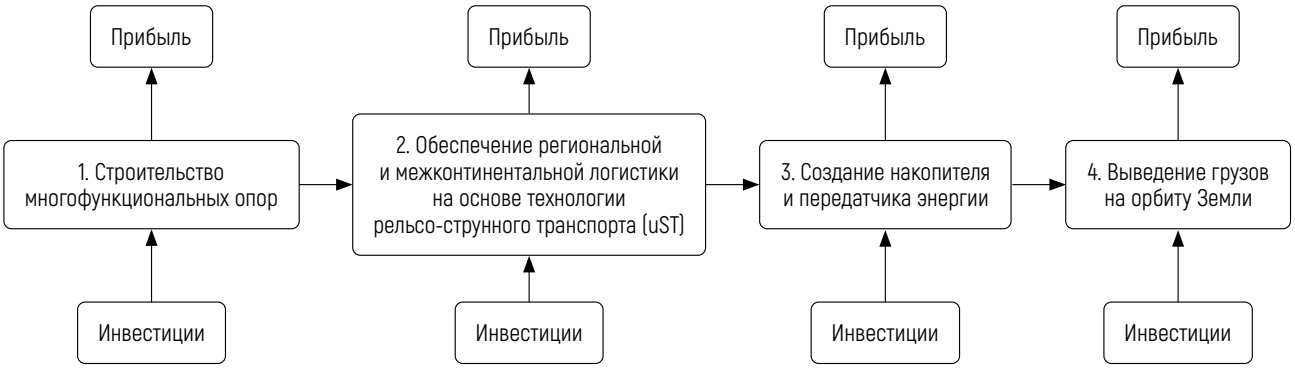


Рисунок 1 – Этапы создания uWay и ОТС

Дорожная карта строительства uWay

Исходя из анализа [13], в данной работе уместно выделить следующие основные шаги строительства uWay:

- возведение в экваториальных районах Земли многофункциональных опор (на земле и воде; жилые и коммерческие), оснащённых системами метеонаблюдения, мобильной и космической связи, навигации, а также аварийно-спасательными терминалами и др.;
- соединение опор uWay рельсо-струнным транспортом;
- возведение эстакады ОТС;
- установка ОТС;
- установка линейных маховиков ОТС, их магнитной подушки и линейного электропривода.

Так, стартом строительства геокосмического транспортно-инфраструктурного комплекса предлагается считать возведение жилых и служебных опор uWay.

Дополнительный стимул для начала работ – возможность применения данных сооружений в качестве:

- элементов внутригосударственных, межгосударственных, трансконтинентальных и трансокеанских коммуникаций, в том числе на основе uST;
- объектов для размещения вышек радиомаяков, мобильной и космической связи, других систем, обеспечивающих навигацию и связь, а значит, безопасность кораблей и самолётов в экваториальной зоне;
- терминалов грузов, накопителей, стационарных линий электропередач;
- вертолётных площадок, аварийно-спасательных терминалов, метеорологических станций для контроля и прогнозирования климата на Земле, что особенно важно для безопасности морского и авиационного транспорта; прочее.

Строительство опор можно также вести поэтапно, в дальнейшем доводя их до высоты эстакады (рисунок 2).

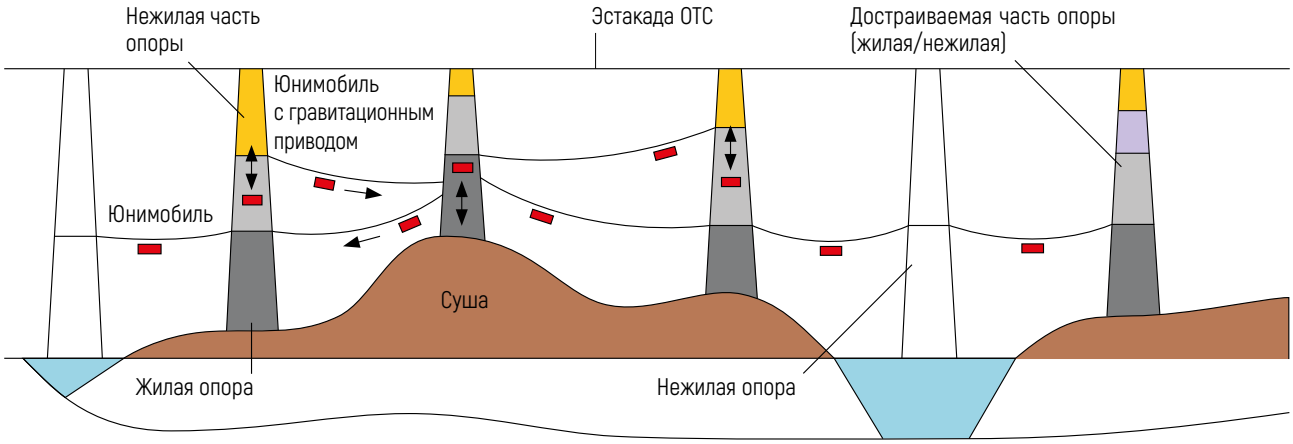


Рисунок 2 – Схема установки опор uWay

В [14] предлагается использовать в качестве опор многофункциональные здания высотой до 100 м, а в районе горной цепи Анд – до 1000–3000 м. Кроме того, рекомендуется в первую очередь возводить их нежилую часть с последующей достройкой жилой составляющей. Однако на первом этапе создания uWay более целесообразным видится сооружение жилой части опор высотой до 100 м (до аутригерного этажа), так как на сегодняшний день уже имеются соответствующие технологии и данный подход позволит решить жилищные проблемы населения экваториальной зоны Земли. Позднее можно достраивать нежилую верхнюю часть опор для установки на них взлётно-посадочной полосы ОТС.

Строительство опор uWay (с различными системами транспортно-инфраструктурного комплекса uST) предлагается вести одновременно в разных экваториальных районах Земли. Здесь непременно возникает вопрос проработки и использования стандарта на опоры, регулирующего требования к местам установки, нагрузкам, высотам, а также к элементам монтажа, энергоснабжению и другим параметрам. В дальнейшем это даст возможность объединить опоры в транспортную и энергетическую сеть.

К общим требованиям к данным конструкциям следует отнести в первую очередь их высоту и шаг размещения, зависящие от рельефа суши на экваторе Земли. Анализ [14] и [15] показал, что целесообразно устанавливать опоры-здания с шагом 1500–2000 м (с учётом условий местности). В будущем это позволит расположить между ними 10–15 обычных опор, не совмещённых со зданиями и сооружениями; оптимальная длина пролётов составит около 200 м.

Благодаря большому пролёту, между высотными опорами-зданиями можно установить однопролётную гибкую рельсо-струнную путевую структуру. Выполнение большепролётной путевой структуры с провисом 50–60 м позволит рельсовым электромобилям (юнимобилям), используя только гравитационный двигатель и гравитационное торможение, развивать скорость до 120 км/ч. Это будет самый скоростной общественный городской транспорт в мире, который свяжет жилые опоры-здания в экваториальный линейный город.

На основании данных, представленных на рисунке 3, а также в [14] и [15], следует отметить, что опоры эстакады целесообразнее строить на одной высоте над уровнем моря. При этом для обеспечения штатного режима работы ОТС, в котором нагрузка на магнитную подушку ленточных маховиков, имеющих скорость около 10 км/с, определяется радиусом кривизны траектории их движения в вакуумных каналах, верх опор должен вписываться в синусоиду с радиусами кривизны не менее 1000 км. Иначе потребуется слишком мощная магнитная подушка, что приведёт к кратному удорожанию ОТС – на триллионы долларов.

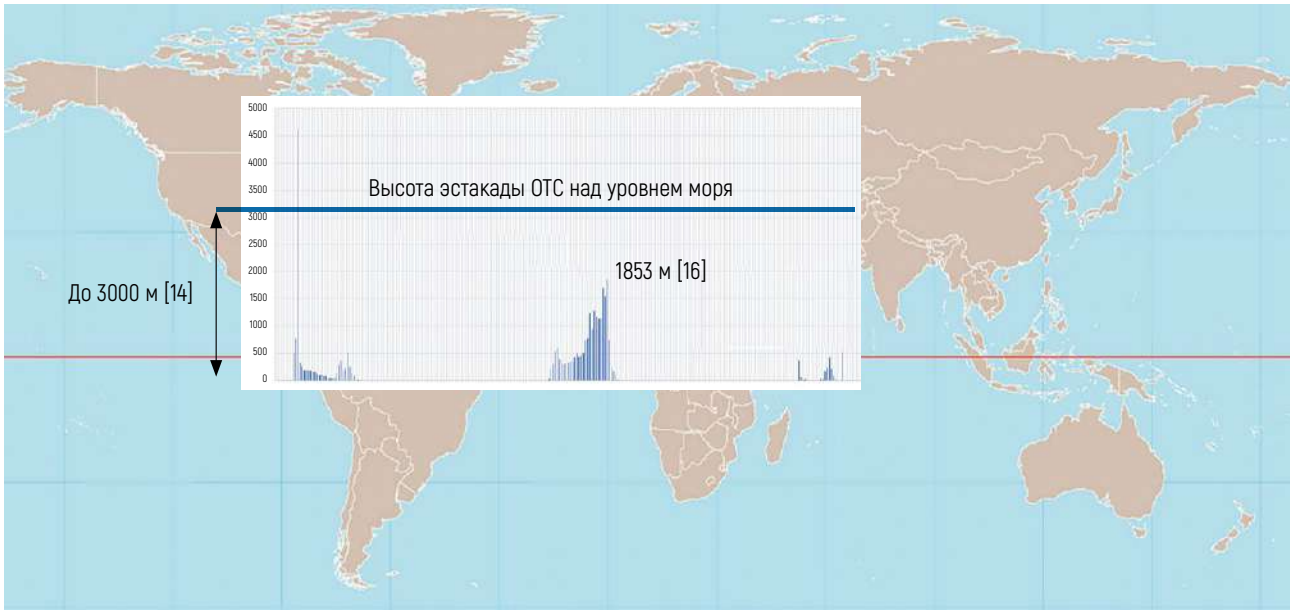


Рисунок 3 – Высота суши над уровнем моря в экваториальной зоне планеты

Анализ [14] и [15] даёт возможность определить следующие параметры опор uWay:

• высота от поверхности суши (на равнине) и воды (в океане) – не более 100 м, в предгорьях – не более 500 м, в горах (Анды) – не более 2000–3000 м;

• поперечный (поперёк экватора) размер опоры у её основания – не более 150 м; соотношение поперечного размера к высоте опоры – не менее 1 : 20, что необходимо для обеспечения устойчивости опор и снижения амплитуды поперечных колебаний верха опоры и, соответственно, взлётно-посадочной полосы ОТС;

• высота строительства первоначальной жилой части опоры – 100 м (с возможностью достройки в горах и предгорьях).

Таким образом, строительство uWay при выполнении указанных условий предлагается реализовать этапами, представленными в таблице 1 (с учётом географических и государственных зон и ожидаемого эффекта).

Таблица 1 – Этапы строительства uWay

Этап	География зон строительства	Действие	Ожидаемый эффект
1	2	3	4
1	Острова Индонезии: Суматра – 456 км, Калимантан – 920 км, Сулавеси – 22 км, Хальмахера – 22 км	Строительство опор на островах Индонезии. Установка транспорта uST	Транспортное сообщение на основе uST между островами Индонезии и внутри них. Жильё и работа для граждан; развитие региональной инфраструктуры, туризма и промышленности. Особенности: • реализация в пределах одного государства; • отработка строительства опор на суше и на море
2	Страны Южной Америки: Бразилия, Колумбия, Эквадор	Строительство опор в Южной Америке. Установка транспорта uST	Сокращение длины маршрута между Атлантическим и Тихим океанами. Транспортное сообщение на основе uST между экваториальными странами Южной Америки и внутри них. Жильё и работа для граждан; развитие региональной инфраструктуры, туризма и промышленности. Особенности: • установка опор в районе вулкана Каямбе (Эквадор). Их максимальная высота над уровнем моря – 4690 м; • отработка технологии преодоления горных массивов
3	Страны Африки: Сомали, Кения, Уганда, Демократическая Республика Конго, Республика Конго, Габон, Сан-Томе и Принсипи (острова)	Строительство опор на континенте и некоторых прибрежных островах Африки. Установка транспорта uST	Сокращение длины маршрута между Индийским и Атлантическим океанами. Транспортное сообщение на основе uST между экваториальными странами Африки и внутри них. Жильё и работа для граждан; развитие региональной инфраструктуры, туризма и промышленности. Особенность: нестабильные государства
4	Акватория Атлантического океана	Строительство плавучих опор в водах Атлантического океана. Установка транспорта uST	Транспортное сообщение на основе uST между Африкой и Южной Америкой. Улучшение навигации, связи и безопасности в экваториальной части Атлантического океана. Особенности: • работа в пределах международного морского права; • отработка строительства океанической части опор
5	Акватория Индийского океана, в том числе Мальдивские острова	Строительство плавучих опор в водах Индийского океана и стационарных опор на некоторых его островах. Установка транспорта uST	Транспортное сообщение на основе uST между островами Индонезии, Африкой и акваторией Индийского океана. Улучшение навигации, связи и безопасности в экваториальной части Индийского океана. Особенность: работа в пределах международного морского права и законодательства одного государства

Окончание таблицы 1

1	2	3	4
6	Акватория Тихого океана, в том числе острова: Галапагос (Эквадор), Лайн (США, Кирибати), Бейкера (США), Гилберта (Кирибати)	Строительство плавучих опор в водах Тихого океана и стационарных опор на его экваториальных островах. Установка транспорта uST	Транспортное сообщение на основе uST между Южной Америкой, островами Тихого океана, Индонезией и акваторией Тихого океана. Улучшение навигации, связи и безопасности в экваториальной части Тихого океана. Особенность: островные экономические зоны Эквадора, Кирибати и США
7	Экваториальная, субэкваториальная и тропическая зоны Земли	Использование опор для создания единой экваториальной транспортной сети Земли	Внутригосударственная, межгосударственная, межконтинентальная и трансокеанская перевозка людей и грузов с использованием uST. Особенности: • формирование единого управления планетарным транспортом на базе независимой международной экваториальной организации; • проблемы разделения интересов
8		Строительство эстакады и установка корпуса ОТС	Высокоскоростная перевозка людей и грузов в области экватора. Особенность: использование лёгких и сверхпрочных строительных материалов
9		Установка линейных маховиков с системой их управления. Работа маховиков в режиме накопителя электрической энергии и её передатчика вдоль экватора	Аккумулирование и передача электроэнергии вдоль экватора, а также работа uWay и ОТС в единой энергетической системе планеты к северу и югу от экватора. Особенность: организация и проверка энергетических балансов в различных режимах работы планетарного транспорта
10	Экваториальная зона Земли и ближний космос	Работа ОТС в режиме подъёма на орбиту и спуска на Землю	Космический туризм. Строительство космического индустриального ожерелья «Орбита» и взаимодействие с ним. Особенность: организация и проверка работы ОТС вне эстакады на атмосферном и орбитальном участках полёта

Обоснование первого этапа строительства uWay

Исходя из потребностей экваториальных стран в решении жилищных и транспортных проблем, целесообразно начать строительство uWay (первый этап) с возведения жилых опор на островах Индонезии, где работа будет осуществляться в пределах одного государства, имеющего большое количество островов и высокую потребность в их транспортной связи (рисунок 4).

Отсутствие необходимости согласования строительства с другими государствами и высокий человеческий потенциал будут способствовать возведению опор. Реализация первого этапа станет ярким примером и весомым стимулом для инвесторов, подтверждая успешное осуществление остальных стадий создания общепланетарного транспорта.

Согласно [14] количество людей на каждый этаж конической опоры-здания можно определить по следующей зависимости:

$$N(h) = \frac{3}{5z}\left(\sum_{0}^{l}(D_i - hK)\right), \qquad (1)$$

где h – высота этажа, равная 3 м;

z – норма квадратных метров на одного жителя опоры-здания, равная 40 м^2;

D_i – диаметр опоры-здания у основания i-го этажа, м (D_0 = 120 м);

K = 1 : 0,09 – конусность здания.

Количество этажей l в зависимости от высоты опоры укрупнённо можно определить по формуле:

$$l \approx H/h. \qquad (2)$$

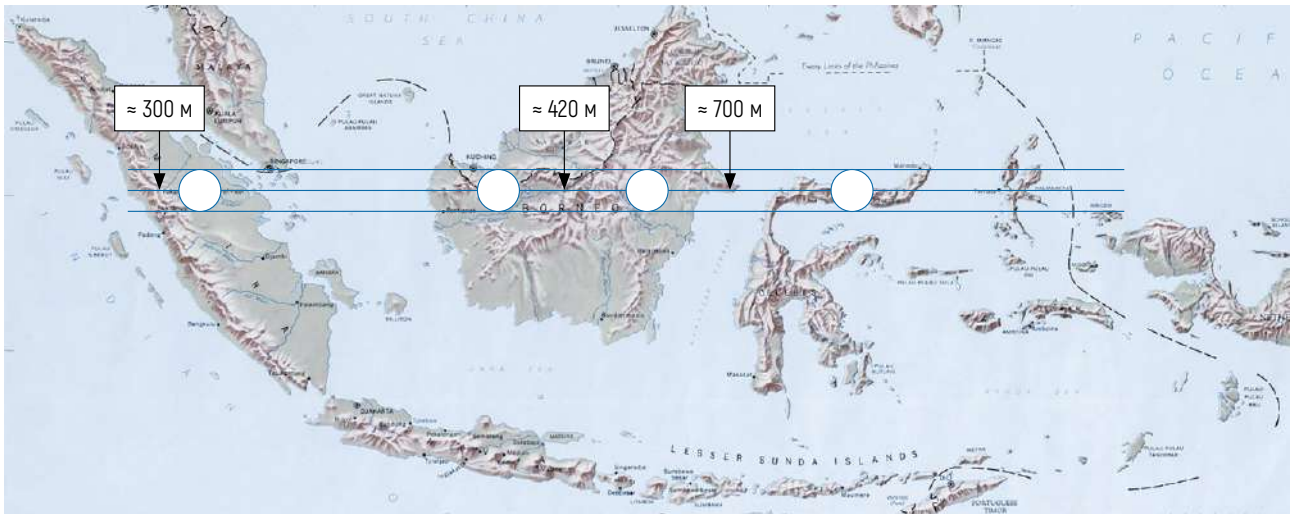


Рисунок 4 – Ориентировочные области установки первых опор uWay на островах Индонезии

Так, при высоте жилой части опоры H = 100 м количество этажей составит 33, на которых смогут проживать 5202 жителя.

В таблице 2 представлены данные о количестве жителей опор, которые можно разместить на островах Индонезии на первоначальном этапе строительства uWay (шаг между опорами – 1600 м).

Таблица 2 – Количество жителей при разной высоте опор над поверхностью суши

Остров (длина суши по экватору)	Количество опор, шт. (шаг 1600 м)	Количество жителей, чел.		
		Высота опоры 100 м	Высота опоры 200 м	Высота опоры 300 м
Суматра (456 км)	286	1 487 772	2 755 610	3 849 846
Калимантан (920 км)	576	2 996 352	5 549 760	7 753 536
Сулавеси (22 км)	15	78 030	144 525	201 915
Хальмахера (22 км)	15	78 030	144 525	201 915
Всего		4 640 184	8 594 420	12 007 212

Следует отметить, что возможность более плотной установки промежуточных опор позволяет увеличить их количество и тем самым в несколько раз расширить жилые площади для населения Индонезии.

С целью обоснования высоты опор, планируемых к возведению на территории Индонезии, представлены высоты островов над уровнем моря вдоль экватора Земли (рисунок 5).

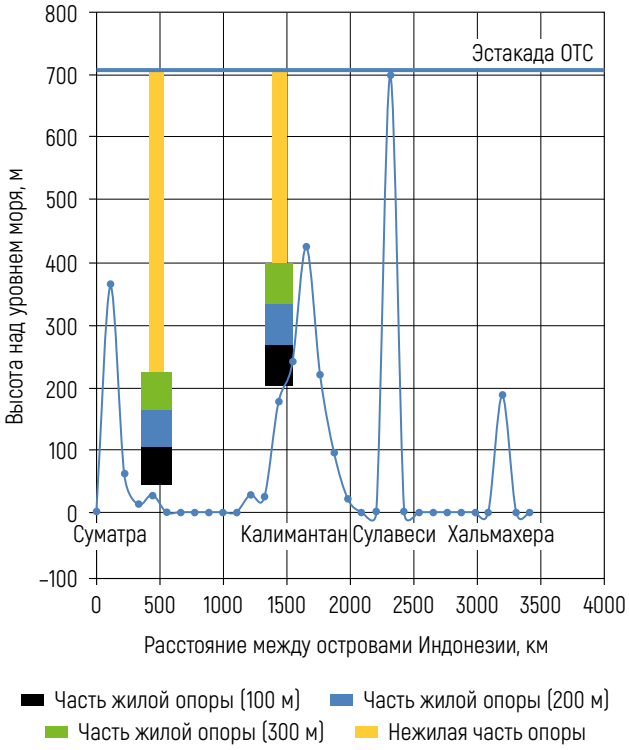


Рисунок 5 – Ориентировочная высота суши над уровнем моря вдоль экватора Земли в районе Индонезии

Полная высота опоры над уровнем моря согласно рисунку 5 может достигать 700 м (в зависимости от допустимого отклонения ОТС от экватора Земли), однако высоту её жилой составляющей предлагается ограничить 300 м. Синусоидальная кривая, соединяющая верх опор, должна иметь радиус кривизны, как обосновано ранее, не менее 1000 км. При этом высота опор в океане, откуда начнётся синусоидальная кривая искривления ОТС по высоте, не должна быть больше 100 м из-за чрезмерной их стоимости, пропорциональной квадрату высоты опор.

Таким образом, практическая реализация элементов планетарного транспорта (uWay, ОТС, uST, маховики и др.), начиная с части жилых опор высотой около 100 м на суше, будет иметь мультипликативный эффект: даст толчок развитию энергетики, добывающих и перерабатывающих проектов, строительству, производству стройматериалов и конструкций, др. Ввод новых электростанций с применением технологии замкнутого ядерного топливного цикла [5] и электросетей, связанных в единую энергосистему [6], станет базой для эволюции промышленности, инфраструктуры, повысит уровень жизни населения экваториальной зоны Земли.

Появившаяся в Индонезии на первом этапе строительства uWay удобная транспортная (на основе uST) и гостиничная инфраструктура будет востребована при организации пассажирских маршрутов в труднодоступные, но живописные и привлекательные для туристов районы островов Калимантан и Суматра, а также внутреннего залива острова Сулавеси, Молуккских островов, где возможна организация дайвинга, в том числе в известном морском национальном коралловом парке Раджа-Ампат.

Заключение

Дальнейшие шаги в разработке стратегии реализации проекта uWay планируется направить в область оценки ресурсов территорий и акваторий, в районах которых на разных этапах будут создаваться элементы программы uSpace и реализовываться проект в целом. Следует изучить трудовые, интеллектуальные, природные, энергетические и прочие резервы, а также потребности для обеспечения строительства и функционирования элементов uWay и ОТС. Для их ритмичного поэтапного возведения требуется детальное планирование, так как некоторые объекты, например энергетические или перерабатывающие предприятия, строятся годами. Не должно появляться лимитирующих строек, тормозящих проект. Именно тщательное обоснование этапов строительства в виде глубокого и продуманного планирования с расчётом рисков и подготовкой резервных вариантов сможет привлечь инвесторов и необходимые технологии для создания общепланетарного геокосмического транспорта.

Реализация программы uSpace станет самым большим объединяющим (для развивающихся и развитых стран) историческим проектом в масштабе Земли, поскольку:

- будет способствовать решению глобальных гуманитарных и социальных проблем (голод, пандемии и эпидемии, бедность), что позволит снизить социальную напряжённость и увеличить политическую стабильность в развивающихся странах. Кроме того, строительство uWay будет содействовать проведению в проблемных странах Африки политики, ориентированной на долгосрочные национальные интересы, что значительно увеличивает шансы успешного завершения проекта;
- для развитых стран, участвующих в программе, очевиден мультипликативный эффект развития науки и технологий при решении многочисленных научных, технических и технологических проблем, которые будут возникать на этапах осуществления проекта. Полная реализация программы с созданием космического индустриального ожерелья «Орбита» обеспечит освоение ближнего космоса, прежде всего его энергетических ресурсов, и запуск новых производств. Кроме того, это послужит базой для более глубокого проникновения человечества в космическое пространство, а значит, для получения огромной прибыли.

Список основных источников

1. *uSpace. Геокосмическая программа безракетного освоения ближнего космоса для спасения жизни на Земле // uSpace. – URL: https://uspaceprogram.com/?lang=ru/ (дата обращения: 16.06.2025).*
2. *Мусаева, С.И. К вопросу о строительстве Суэцкого канала / С.И. Мусаева // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Общественные и гуманитарные науки. – 2011. – №° 2 (11). – С. 54–60.*
3. *Молчанов, В.К. Проблемы строительства и хозяйственного освоения БАМа / В.К. Молчанов // Иркутский историко-экономический ежегодник. – Иркутск, 2011. – С. 182–187.*
4. *Мухарданов, С.Н. Перспективы развития инфраструктуры в России на примере Крымского моста / С.Н. Мухарданов //*

Трансформация национальной социально-экономической системы России: материалы V междунар. науч.-практ. конф., Москва, 2 дек. 2022 г. / Рос. гос. ун-т правосудия. – М., 2023. – С. 123–127.

5. *Юницкий, А.Э. Применение технологий замкнутого ядерного топливного цикла для функционирования общепланетарного транспортного средства / А.Э. Юницкий, В.Н. Гаранин, А.А. Боровик // Индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 194–201.*
6. *Юницкий, А.Э. Применение общепланетарного транспортного средства в качестве элемента единой энергетической системы Земли / А.Э. Юницкий, В.Н. Гаранин, А.А. Боровик // Индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 186–193.*
7. *Юницкий, А.Э. Водные океанические участки с плавучей эстакадой общепланетарного транспортного средства / А.Э. Юницкий, С.В. Артюшевский // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы III междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 12 сент. 2020 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2021. – С. 152–169.*
8. *Дашков, С.А. Демография и экология / С.А. Дашков // Вызовы современности и стратегии развития общества в условиях новой реальности: сб. материалов XII междунар. науч.-практ. конф., Москва, 25 нояб. 2022 г. / М-во науки и высш. образования РФ [и др.]; отв. ред. З.Ш. Бабаева. – М., 2022. – С. 184–190.*
9. *Юницкий, А.Э. Магнитная система силового стабилизирующего узла общепланетарного транспортного средства / А.Э. Юницкий, В.Л. Лукша // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы V междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 23–24 сент. 2022 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2023. – С. 56–63.*
10. *Erickson, J. Living the Dream – An Overview of the Mars Exploration Project / J. Erickson // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2006. – Vol. 13, iss. 2. – P. 12–18.*
11. *Noprisson, H. Implementasi Metodologi Agile Software Development pada Proyek Perangkat Lunak / H. Noprisson // JUSIBI (Jurnal Sistem Informasi dan Bisnis). – 2023. – Vol. 5, No. 2. – P. 94–102.*
12. *Юницкий, А.Э. Взлётно-посадочный комплекс общепланетарного транспортного средства на океанических участках / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 214–225.*
13. *Общепланетарное транспортное средство и космическое ожерелье «Орбита» как альтернатива ракетному освоению околоземного пространства / А.Э. Юницкий, С.А. Пронкевич, С.В. Артюшевский, В.Л. Лукша // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2021. – № 4. – С. 364–372.*
14. *Высотные обитаемые опоры взлётно-посадочного комплекса общепланетарного транспортного средства / А.Э. Юницкий, М.В. Кубышкин, А.Г. Кошелев, Р.А. Малахов // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 246–261.*
15. *Юницкий, А.Э. Проектирование и строительство промежуточных опор эстакады общепланетарного транспортного средства: проблемы и решения / А.Э. Юницкий, С.А. Жарый // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы IV междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 18 сент. 2021 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2022. – С. 193–203.*
16. *Калькулятор высоты карты // CalcMaps. – URL: https://www.calcmaps.com/ru/map-elevation/ (дата обращения: 25.01.2025).*

УДК 711.416-122+629.7

Системообразующие предпосылки и понятийно-проблемные комплексы новой урбанистической концепции uCity

А.Э. Юницкий[1, 2]
доктор философии транспорта

М.М. Давыдик[2]

[1] ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

[2] ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

Раскрыты предпосылки новых градостроительных решений и констатирована актуальность формирования понятийного аппарата урбанистической концепции uCity. Рассмотрены подходы к планировке селитебных территорий в различных странах. Отмечены особенности урбанизации в арктическом, умеренном и экваториальном климатических поясах. Описаны преимущества линейной урбанистики в сравнении с агломерационными процессами. Изучена совместимость урбанизационных каркасов современного территориального планирования с градостроительной моделью поселений линейного типа uCity, реализуемой на основе транспортно-инфраструктурной сети uNet . Сделан вывод о рациональности использования сложившихся коммуникационных коридоров для размещения в их пределах структур глобальной сети uNet при строительстве высокоскоростных транспортно-инфраструктурных комплексов uST.

Подчёркнута важность создания и преобразования понятийно-проблемных комплексов, которые задают структуру терминов и определений в рамках данной урбанистической концепции и фиксируют проводимые всесторонние исследования, процессы осмысления и познания через совокупность различных традиционных и инновационных категорий, связанных общим назначением.

Отмечено влияние природных систем на планировку, функционирование и эволюцию городов. Для обеспечения автономности предложено формировать поселения линейного типа uCity, используя возможности технологических платформ EcoHouse, uEnergy и uGreen. Рекомендовано учитывать синергетические процессы «спонтанной самоорганизации» при создании совместимых с живой природой градостроительных комплексов, чтобы придать городской структуре регулируемость, устойчивость к стрессам и адаптивность к изменениям.

Ключевые слова:
жилой кластер, линейный город uCity, линейный тип расселения, общепланетарное транспортное средство (ОТС), Струнные технологии Юницкого (uST), транспортно-инфраструктурная сеть uNet, экваториальный линейный город (ЭЛГ), эмерджентная урбанистика.

UDC 711.416-122+629.7

Systemic Preconditions and Set of Interrelated Concepts and Problems of the New Urban uCity Framework

A. Unitsky[1, 2]
Dr. of Philosophy in Information Technologies (Transport)

M. Davydik[2]

[1] Astroengineering Technologies LLC, Minsk, Belarus

[2] Unitsky String Technologies Inc., Minsk, Belarus

This paper outlines the preconditions for new urban planning solutions and emphasizes the relevance of establishing definitions of the urban uCity framework. Approaches to urban area planning in various countries are examined, highlighting the characteristics of urbanization in Arctic, temperate, and equatorial climatic zones. The advantages of linear urbanism are discussed in comparison to agglomerative processes. The compatibility of urbanization frameworks in contemporary territorial planning with the urban model of uCity linear settlements is analyzed, which is implemented based on the transport and infrastructure network uNet. The study concludes that utilizing existing communication corridors to accommodate the infrastructure of the global uNet network within them during the construction of high-speed uST transport and infrastructure complexes is rational.

The importance of creating and transforming a set of interrelated concepts and problems is emphasized, as they define the structure of terms and definitions within this urban framework while also documenting comprehensive research efforts and processes of understanding through a combination of traditional and innovative categories linked by a common purpose.

The influence of natural systems on the planning, functioning, and evolution of cities is also noted. To ensure autonomy, it is proposed to establish linear settlements of uCity utilizing the capabilities of technological platforms such as EcoHouse, uEnergy, and uGreen. Additionally, it is recommended to consider the synergistic processes of "spontaneous self-organization" when creating urban complexes compatible with live nature, thereby enhancing the city's structure with controllability, stress resilience, and adaptability to change.

Keywords:
emergent urbanism,
Equatorial Linear City (ELC),
General Planetary Vehicle (GPV),
linear city (uCity),
linear settlement type,
residential cluster,
transport and infrastructure network uNet,
Unitsky String Technologies (uST).

Введение

Становление и рост городских поселений – основополагающая идея развития человеческой цивилизации. Городская ткань исторически формировалась благодаря сложным процессам, обусловленным различными факторами: географическим положением, климатом, социальными предпочтениями, экономическими и политическими отношениями. Города обладают огромными материальными и человеческими ресурсами и являются центрами разработки и внедрения инноваций, обмена знаниями, рождения новых идей. Город состоит из людей, создаётся людьми и существует для людей. В этом заключается его предназначение.

Градостроительство – направленный во времени процесс, который реализуется через градостроительное (территориальное) планирование, размещение объектов, застройку территорий и учитывает историко-культурные, природные и иные факторы [1].

Человечество в различных формациях демонстрирует устойчивый запрос на организацию мест, максимально приспособленных к окружающей среде, защищённых от опасностей и удобных для жизни [2]. Однако сложившиеся города представляют собой средоточие нарастающих социальных и экологических проблем техногенной цивилизации. Без их осмысления человечество столкнётся с необратимыми последствиями деградации окружающей среды и ухудшением условий своего существования.

Растущая взаимная зависимость между странами и народами диктует целесообразность единых подходов в сфере урбанистики. Авторы статьи видят гармонизацию усилий в этой области посредством внедрения комплекса экоориентированных технологий, как это изложено в программе «ЭкоМир» [3]. Градостроительной частью программы является модель линейного расселения uCity (линейный город uCity). Коротко её можно определить как пешеходное городское поселение кластерного типа, где поверхность земли предназначена для людей, животных и зелёных насаждений, а транспортные, энергетические и информационные коммуникации размещены на втором уровне – над поверхностью земли (воды) на высоте от 6 м [4–6]. Модель линейного расселения uCity интегрирована в транспортно-инфраструктурную сеть uNet, которая представляет собой международную сеть транспортных, энергетических и информационных коммуникаций, организованную на базе транспортно-инфраструктурных решений uST.

Настоящая статья является частью научного исследования «Создание градостроительной модели поселений линейного типа uCity, реализуемой на основе транспортно-инфраструктурной сети uNet», которое проводится ЗАО «Струнные технологии» (г. Минск, Беларусь). Соответствующие подтверждающие расчёты, технико-экономические обоснования и визуализация предлагаемых решений станут результатами названного проекта. Цель данной работы – выявить предпосылки новых градостроительных концепций, имеющихся в практике ряда стран, и констатировать актуальность формирования понятийного аппарата урбанистической концепции uCity.

Анализ отечественных и зарубежных подходов в градостроении, определение предпосылок новой урбанистики

Глобальная урбанизация – объективный и усиливающийся процесс, охватывающий страны и континенты. По данным Организации Объединённых Наций, городское население мира стремительно выросло с 751 млн человек в 1950 г. до 4,2 млрд в 2018 г. На текущий момент 55 % людей на планете проживают на урбанизированных территориях, к 2050 г. 68 % землян станут горожанами [7].

Устойчивое развитие общества зависит от успешного управления ростом городов. В государствах с низким и средним уровнем доходов прогнозируемые темпы урбанизации будут самыми высокими. Такие страны столкнутся с трудностями в обеспечении городского населения жильём, транспортными услугами, энергетическими системами и другой инфраструктурой, а также с проблемами в сфере занятости, образовании и здравоохранении. Требуются глобальные усилия в разработке комплексной политики по улучшению жизни как в городах, так и в сельской местности. Знакомство с текущими процессами градостроительной практики на примере некоторых государств поможет обнаружить предпосылки линейной урбанистики и лучше осознать её необходимость.

Градостроительная практика на территории Беларуси и России

С 1991 по 2021 г. уровень урбанизации в Республике Беларусь вырос с 66,3 до 77,5 %. В 2030 г. он превысит 80 % [8]. Вопрос градостроительства в стране сегодня регламентируется государственной политикой, главные принципы реализации которой изложены в соответствующих нормативных документах. Один из них устанавливает комплексное развитие территорий на основе градостроительного (территориального) планирования и зонирования.

На схеме урбанизационного каркаса территории Беларуси показаны коридоры-русла, сформированные на базе

транспортных коммуникаций различного уровня (рисунок 1). По ним перемещаются грузы и пассажиры, вдоль них расположены крупные поселения, благодаря им осуществляются связи внутри и вне страны.

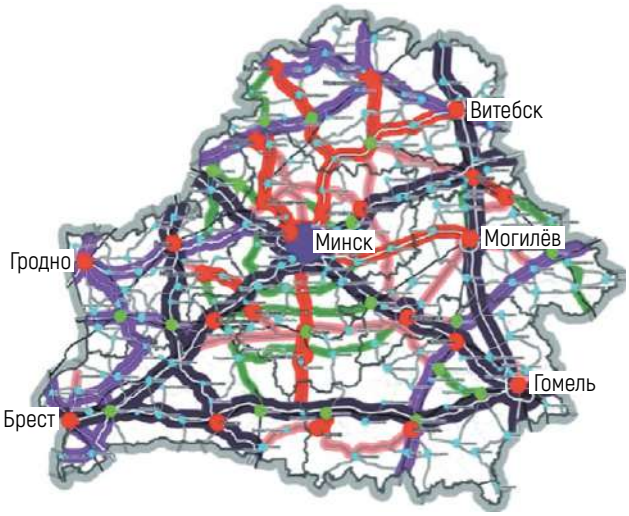


Рисунок 1 – Схема урбанизационного каркаса территории Республики Беларусь [8]

Линейная урбанистика представляется естественным процессом градостроительного развития. В качестве характерного примера линейных трансформаций в системе расселения приведём схему размещения жилищно-гражданского строительства и производительных сил, разработанную для г. Минска (рисунок 2). Она отображает постепенное преобразование замкнутой радиально-кольцевой структуры отдельного города во взаимосвязанную систему элементов линейно-лучевой урбанизированной агломерации [9].

Агломерационные процессы характерны для многих крупных городов в различных странах, включая Беларусь и Россию. Вокруг таких городов формируется сеть поселений-спутников, образуя агломерированное пространство. Наряду с явными преимуществами эти процессы порождают и дисбалансы в социально-экономическом развитии страны, приводя к перенапряжению в социальной сфере, повышая стоимость жизни и значительно воздействуя на окружающую среду. Учёные, исследующие эту область градостроения, выделяют несколько этапов организации агломерации как своеобразный алгоритм данного процесса:

- миграция населения в крупные города ввиду роста строительства жилой и транспортной инфраструктуры;
- субурбанизация за счёт оттока наиболее состоятельных граждан в пригороды;
- дезурбанизация по причине вывода крупными предприятиями своих мощностей за пределы города-центра и миграции людей в города-спутники;
- реурбанизация через концентрацию населения в ядре и спутниках агломерации и развитие сектора бизнес-услуг;
- формирование агломераций второго порядка в крупнейших агломерациях, когда центрами становятся отдельные города-спутники [10].

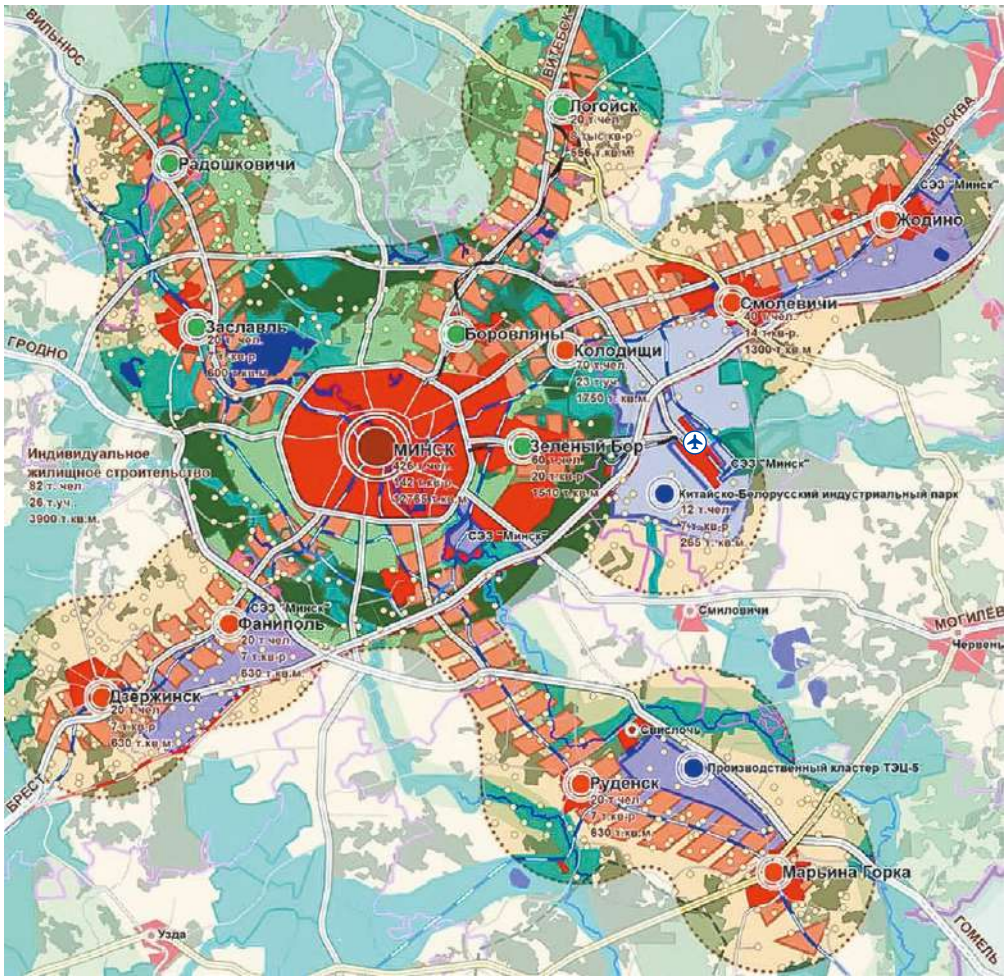
Усиление обозначенных тенденций в ближайшей перспективе заставляет научно-экспертное сообщество искать альтернативы данному процессу. В «Терминологическом словаре по градостроительству» [11], изданном Российской академией архитектуры и строительных наук, в конструктивном замысле градостроительного развития выделяются две концепции:

- урбанизм, считающий города-мегаполисы закономерным признаком современной промышленно-технической цивилизации;
- дезурбанизм, называющий безудержный рост городов социальным злом.

На наш взгляд, градостроительные решения должны определяться гармоничным сочетанием этих двух концепций, когда человеку доступны все цивилизационные блага большого города одновременно с преимуществами здоровой жизни в малом поселении на лоне природы. Линейная модель расселения uCity поддерживает такое сочетание, размещая контролируемые по объёму и составу функциональные элементы городской структуры в самодостаточных кластерах и связывая их сетями струнного транспорта.

Многие разработки урбанистов Российской Федерации сосредоточены на развитии северных регионов страны. Экономическое пространство Европейского Севера России (ЕСР) предлагается трансформировать, используя следующие планировочные модели [12]:

- функциональную – социально-экономическое районирование, организация специализированных зон, ареалов, парков;
- каркасную – создание территориальных каркасов, коридоров, осей развития, агломераций и городов-ядер на базе инфраструктуры;
- кластерную – локализация на ограниченной территории жизненно необходимых элементов расселения, обеспечивающих автономное существование объекта.



Граница агломерации г. Минска

Территориальные зоны

- Градостроительного развития городских населённых пунктов
- Зелёное кольцо г. Минска
- Экологический каркас
- Лесохозяйственная
- Сельскохозяйственная
- Сектор развития ландшафтно-рекреационной функции
- Сектор развития высоких технологий
- Сектор развития промышленного производства
- Векторы развития жилищного строительства

Опорные центры агломерации г. Минска

- г. Минск – центр агломерации
- Города многопрофильного развития
- Города приоритетного развития туристских и рекреационных функций
- Производственные кластеры
- Национальный аэропорт

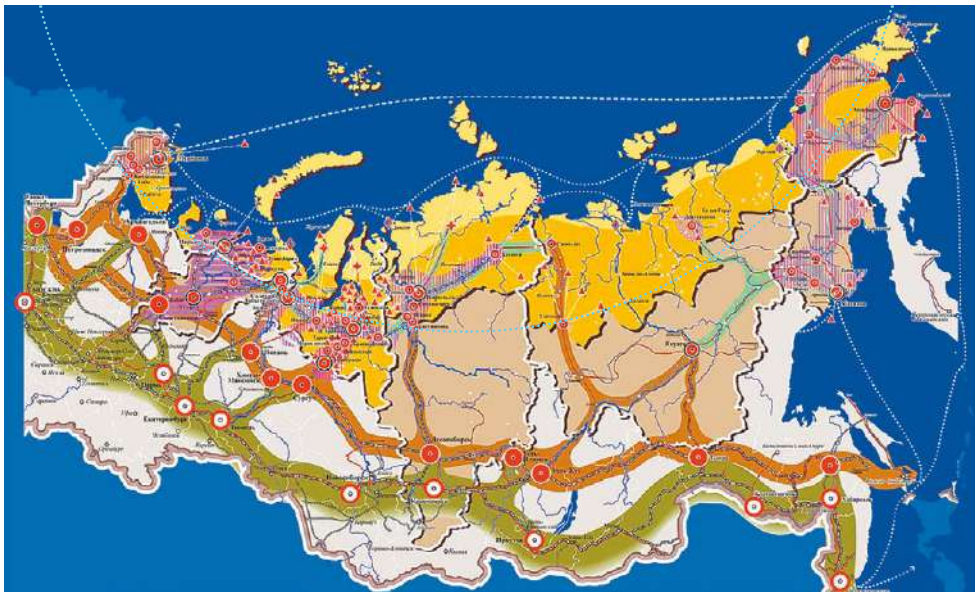
Планировочные оси

- Автодороги международного значения
- Железная дорога
- Проектируемая высокоскоростная железная дорога
- Проектируемые пути скоростного трамвая

Рисунок 2 – Схема размещения жилищно-гражданского строительства и производительных сил в Минской агломерации [9]

Схема перспективных региональных систем расселения на пространстве Российской Федерации (рисунок 3), включая ЕСР, позволяет сочетать каркасную и кластерную модели для имплементации транспортно-инфраструктурных решений uST в регионах Арктики.

В противовес тенденции концентрации жителей в крупных городах и обезлюдения огромных территорий вдали от агломераций будет уместно предложить взаимоувязанное решение в новой экономической и урбанистической концепции линейного расселения.



Государственная граница РФ
Границы субъектов РФ
Границы субъектов РФ зоны Крайнего Севера
Северный полярный круг
Центральные и южные территории РФ
Территории субъектов РФ зоны Крайнего Севера
Административные центры субъектов РФ
Административные центры субъектов РФ зоны Крайнего Севера

Арктика
Высокая Арктика
Субарктика

Опорные центры каркаса РФ
Опорные центры каркаса Севера
Базовые города
Организационно-хозяйственные центры
Сельские центры муниципальных районов
Центры традиционной хозяйственной деятельности
Форпосты
Инфраструктурные вахтовые посёлки
Вахтовые посёлки

Межрегиональная система расселения
Региональная система расселения
Местная система расселения
Опорный каркас РФ
Опорный каркас Севера
Меридиональные оси Севера
Арктическая ось расселения
Железные дороги
Автомобильные дороги
Транзитные и экспортно-импортные перевозки
Перевозки внутри Арктической зоны

Рисунок 3 – Стратегический градостроительный проект «Арктика» [13]

Градостроительные подходы к планировке селитебных территорий в США

Изучая практику федеральных отношений в области градостроения на территории Соединённых Штатов Америки, следует отметить, что Конституция США не содержит положений о местном самоуправлении, но законодательную основу обеспечивают конституции отдельных штатов. Это устанавливает принцип адаптации к конкретным условиям и предоставляет американским городам право разрабатывать собственные уставы, определяющие весь спектр организации жизни. Прерогативы местного самоуправления – жилищная политика и городская реконструкция. Федеральная власть может принимать участие в развитии жилой среды посредством специальных субсидий (гранты), выделяемых созданными для данной цели особыми государственными фондами [14].

Регулирование планировки и застройки городов осуществляется через правовое зонирование территории, которое оформляется в виде отдельного документа как на стратегическом, так и на локальном уровнях. В США территории нормативно дифференцированы на следующие основные зоны: урбанистические, сельскохозяйственные и экологические. Принцип зонирования является самым распространённым методом регулирования местного землепользования.

Не все поселения в США создают генеральные планы. Довольно часто «принято разрабатывать схемы или планы градостроительного развития – градостроительные документы, адаптированные для работы городской администрации и индивидуальных застройщиков или инвесторов» [15].

Бурное развитие транспортных систем дало возможность освоить за сравнительно короткие сроки значительные пространства страны и вывело США в лидеры мировой экономики. Сегодняшний день диктует новые условия успеха благодаря внедрению высокоскоростных коммуникаций, которые позволяют за меньший срок перемещать большее количество грузов и пассажиров. Транспортно-инфраструктурная сеть uNet, основанная на рельсо-струнных решениях uST – городских, междугородных и грузовых транспортных коммуникациях, способна реализовать задачи данного уровня [4–6].

Сеть автомобильных дорог в США развита как в широтном, так и в меридиональном направлениях. К примеру, шоссе Route 50 (US 50) длиной 3019 миль (4859 км) соединяет восточное и западное побережья страны, пересекая территории 12 штатов вдоль 37-й параллели (рисунок 4).

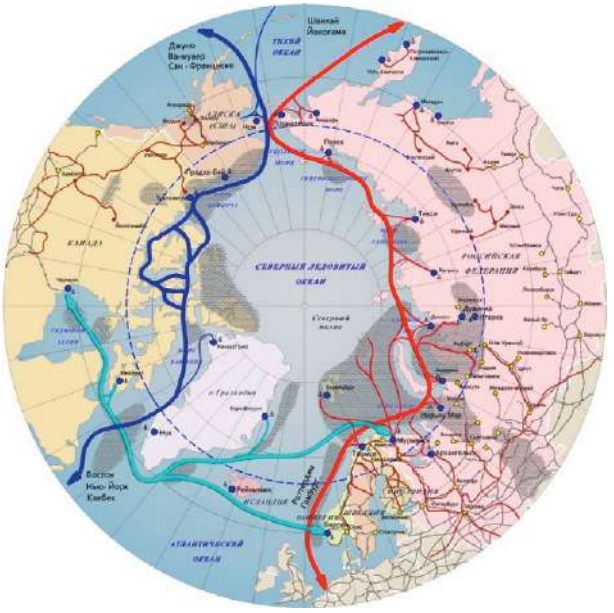
Рисунок 4 – Трансконтинентальная автомобильная трасса US 50 [16]

Использование подобных коммуникационных коридоров при строительстве на территории США высокоскоростных систем uST позволит размещать в их пределах транспортно-инфраструктурные комплексы глобальной сети uNet.

Особенности урбанистического освоения территорий Арктики

Арктические территории являются пространством политических, экономических, ресурсных и коммуникационных интересов. Государствами арктической зоны в структуре ООН сформирован Арктический совет, в состав которого входят восемь членов: Канада, Дания (включая Гренландию и Фарерские острова), Финляндия, Исландия, Норвегия, Россия, Швеция и США [17].

Недавние открытия крупнейших углеводородных месторождений на шельфах северных морей и усилившееся таяние ледников в Арктике создают новые предпосылки для развития трансарктических морских коммуникаций (рисунок 5).



Северный полярный круг
Железные дороги
Автомобильные дороги
Предполагаемые районы местонахождения нефти и газа

Основные морские пути
Северный морской путь
Арктический мост
Северо-западный проход

Рисунок 5 – Схема топливно-энергетических ресурсов и морских коммуникаций в районе Арктики [18]

Коммуникационные коридоры играют ведущую роль в экономическом освоении ресурсов Арктики. Погодные и климатические условия данного региона диктуют особые требования к урбанизации территорий. Градостроительные процессы здесь определяются не только суровым климатом, но и собственной спецификой исторического пути каждой из стран. До середины XIX в. поселения в Арктике формировались исходя из торговых и промысловых задач, поэтому система расселения, как правило, представляла

собой структуру из небольших посёлков, насчитывающих до 100 человек. Во второй половине XIX в. на территориях Аляски и Канады были открыты большие залежи металлов, что повлекло за собой организацию сравнительно крупных населённых пунктов, ориентированных на добычу и первичную переработку полезных ископаемых. Освоение Русского Севера началось с середины 1920-х годов [18].

Без эффективной транспортно-инфраструктурной сети дальнейшее развитие Арктики не будет иметь успеха. Важно не только наладить транспортное обеспечение, но и предоставить населению этого региона комфортные условия проживания. Новая урбанистика, насыщенная технологиями uST, предлагает интегрированные решения поставленных задач, связывая струнными дорогами в единую систему криптоклиматические комплексы жилого, производственного, научного и навигационного назначения.

Градостроительные особенности освоения экваториальной зоны в Южной Америке

Основной участок экваториальной зоны планеты принадлежит океанам (32 000 км), и всего 8000 км размещаются на суше. Часть этих земель находится в Южной Америке – в пределах Эквадора, Колумбии и Бразилии.

Экваториальные территории Колумбии и Бразилии преимущественно заняты дождевыми лесами (сельвой); поселения коренных жителей встречаются редко. В юго-восточной части Колумбии нет автомобильных дорог, поэтому сообщение, как правило, осуществляется водным и воздушным транспортом. Освоенность бассейна Амазонки в Бразилии также остаётся низкой. Наиболее заселённым является Эквадор, где доля горожан в 2023 г. была на уровне 64,79 % [19].

В экваториальной зоне Эквадора выделяют три типа территорий: сельва – в восточной части страны; горные районы Анд, протянувшиеся с севера на юг в центре; предгорья Анд и побережье Тихого океана. Горные районы и предгорья Анд урбанизированы в большей степени.

Главные транспортные коммуникации Эквадора – автомобильные дороги (43 000 км), имеется сеть железных дорог (1000 км колеи 1067 мм), присутствуют водные пути (1500 км). Особое место занимает эквадорский участок Панамериканского шоссе (рисунок 6), которое является самой длинной автомобильной трассой в мире (около 30 000 км) и соединяет 14 стран Северной и Южной Америки.

Трасса прерывается только на отрезке длиной 87 км (Дарьенский пробел) на территории Панамы. Альтернативой ему служит короткая паромная линия из г. Турбо (Колумбия) в новый панамский порт на атлантическом побережье.

Рисунок 6 – Схема Панамериканского шоссе с Дарьенским пробелом [20]

Урбанистическая концепция uCity предлагает иное решение – строительство высокоскоростного дублёра Панамериканского шоссе, который в составе всемирной сети uNet не только решит проблему Дарьенского пробела, но и соединит страны обеих Америк с экваториальным линейным городом (ЭЛГ) и взлётно-посадочной эстакадой общепланетарного транспортного средства (ОТС), открывая Эквадору удобный доступ к странам континента и остальным частям мира.

Глобальная транспортно-инфраструктурная сеть uNet может использовать подобные транспортные коридоры, которые будут усилены новыми возможностями пропускной способности и функциональной безопасности.

Предпосылки новой урбанистики в планировочных структурах сложившихся городов

Грамотное планирование территории города влияет на его возможность обеспечивать удобство и безопасность проживания людей, а также на экономическое благополучие и развитие во времени и пространстве.

Старым городам свойственны черты самоорганизующихся (эмерджентных) структур, когда территория осваивалась по принципу спонтанного возникновения и адаптации городских пространств к местным особенностям и потребностям. Современные поселения отличаются регулярным расположением элементов застройки, сформированным в ходе осмысленного централизованного планирования. Однако каким бы совершенным ни был тот или иной план города, ему не суждено стать законченным произведением. Задуманное в кабинетах архитекторов-урбанистов далеко не всегда приводит к ожидаемому результату. В этом процессе обнаруживаются действия других субъектов городского развития, включая обычных людей. Как и любой живой системе, городу присуща динамика роста.

В данной работе мы ищем закономерности планировочной динамики, обращая особое внимание на эффект самоорганизации как наиболее распространённой практики. Если рассматривать градостроительство в глобальном масштабе, то, например, застройка античных городов Средиземноморья, городов и замков средневековой Европы, древних городов Азии и Америки демонстрирует его универсальность. Прочтение контекстов таких явлений и понимание скрытых механизмов их регулирования помогают принимать квалифицированные решения при возведении новых поселений и реорганизации старых.

История городов как процесс преобразования природных ландшафтов зашифрована в сложных узорах городской ткани и становится результатом деятельности многих поколений жителей. Эти «письмена» видны в характерных типах планировочных структур многих сложившихся городов (рисунок 7) [21].

Если современные урбанисты осмыслят значение соучастности в установлении спонтанного порядка в многоплановых городских структурах, то города гармонично встроятся в экосистемы живой природы.

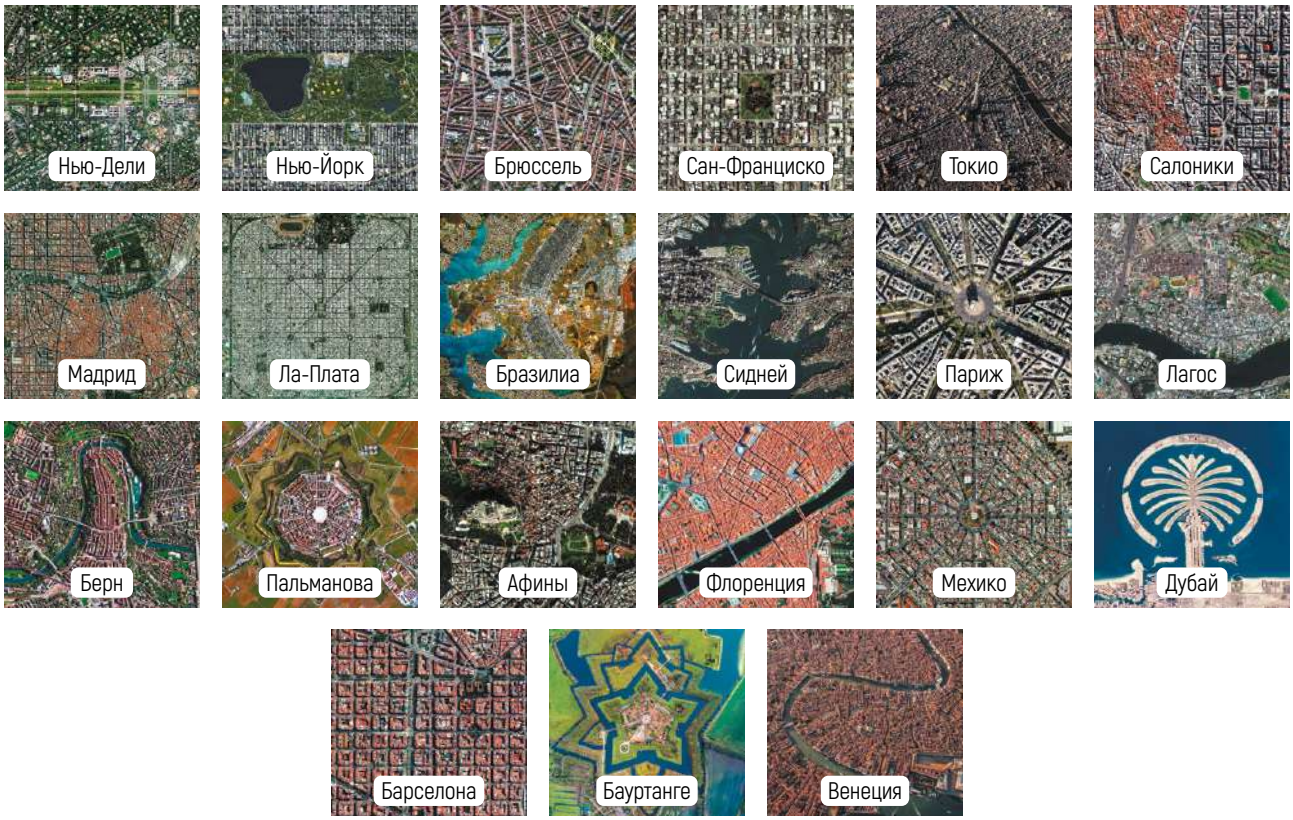


Рисунок 7 – Примеры планировочного освоения территорий городов

Исследователи теории, называемой наукой о сложности, выявили определённые алгоритмы, сопутствующие функционированию любых сложных систем, включая человеческие сообщества. Физик и математик С. Вольфрам в книге «Новый вид науки» (A New Kind of Science) предлагает альтернативный научный метод, необходимый для изучения типов процессов, которые традиционная наука не смогла объяснить, и представляет теорию развития Вселенной как вычислительную систему правил (простых программ) [22]. Архитектор К. Александер в книге «Природа порядка» (The Nature of Order) рассматривает теорию морфогенеза как для естественных физических явлений, так и для человеческих произведений [23]. Эти концепции устанавливают природу динамических процессов, демонстрирующих скрытые паттерны в кажущейся случайности хаотических сложных образований.

Теория самоорганизации адекватно описывает и объясняет поведение сложных городских комплексов. С её помощью можно предсказывать варианты их модернизации, выстраивать рабочую модель регулирования. Сложная самоорганизующаяся городская структура требует замены термина «управление» на термин «регулирование», означающий мягкое управление, действующее в резонансе с органическими тенденциями развивающейся системы [24].

В градостроительстве появилось целое течение – эмерджентный урбанизм, фокусирующийся на концепции спонтанного роста городов снизу вверх, когда их структуры не проектируются регулярным образом, а формируются естественным путём, создавая взаимосвязанные планировочные сочетания [25]. Грамотный ландшафтный дизайнер, например, позволит «натоптать» пешеходные связи, прежде чем приступить к мощению дорожек, а грамотный урбанист обратит внимание на сложившуюся транспортную инфраструктуру, а также на социально-территориальную структуру городского населения, прежде чем заняться проектом планировки места.

Можно выделить следующие тенденции новой урбанистики:

- рост городов и концентрация в них основного населения Земли – необратимый процесс, влекущий за собой серьёзные экономические, политические, экологические и демографические вызовы. Новые поселения необходимо создавать с учётом естественных факторов природы, демографических сдвигов и уровня научно-технического прогресса;
- агломерационные системы расселения распространяются по странам и регионам. Формирование центрированных урбанистических образований одновременно является двигателем экономического развития центральных территорий и фактором деградации периферийных. Изменить такой дисбаланс можно с помощью урбанизационных каркасов, позволяющих регулировать процессы роста городов. Главным инструментом достижения данной цели станет градостроительная модель поселений линейного типа uCity;
- сложившиеся и вновь создаваемые города можно преобразовать в единый живой организм, применяя эффект самоорганизации, учитывающий особенности застраиваемой местности, и распределяя поселения вдоль коммуникационных русел инфраструктурных комплексов uST.

Таким образом, у отечественных и зарубежных градостроительных систем имеются общие черты, позволяющие организовать жизнеспособные и экологически устойчивые структуры расселения в новой урбанистической концепции uCity.

Принципы функциональной организации и пространственной координации элементов линейной системы расселения

Современная цивилизация преобразовала города под удобное пространство для передвижения автомобиля, а не под комфортную среду обитания человека. Совершенно иной принцип провозглашает программа «ЭкоМир»: «Земля – для жизни. Космос – для индустрии». Модель расселения uCity предлагает: городская территория – для человека, пространство над ней – для транспорта. Функциональные элементы в этой модели формируются в пределах пешей доступности; городская ткань состоит из кластеров различного назначения и является частью транспортно-инфраструктурной сети uNet.

Глобальные вызовы требуют глобальных ответов. Схема транспортно-инфраструктурной сети uNet (рисунок 8) представляет структуру коммуникаций в масштабе планеты.

Решение проблемы урбанизационных смещений можно найти в осознании того факта, что Земля – наш единственный дом во Вселенной, который необходимо наилучшим образом обустроить. На основе сети uNet будет формироваться глобальная система расселения UniWorld. Её элементами станут сложившиеся в отдельных странах и регионах планеты урбанизационные каркасы, которые требуют структурирования и понимания своего функционального положения относительно друг друга.

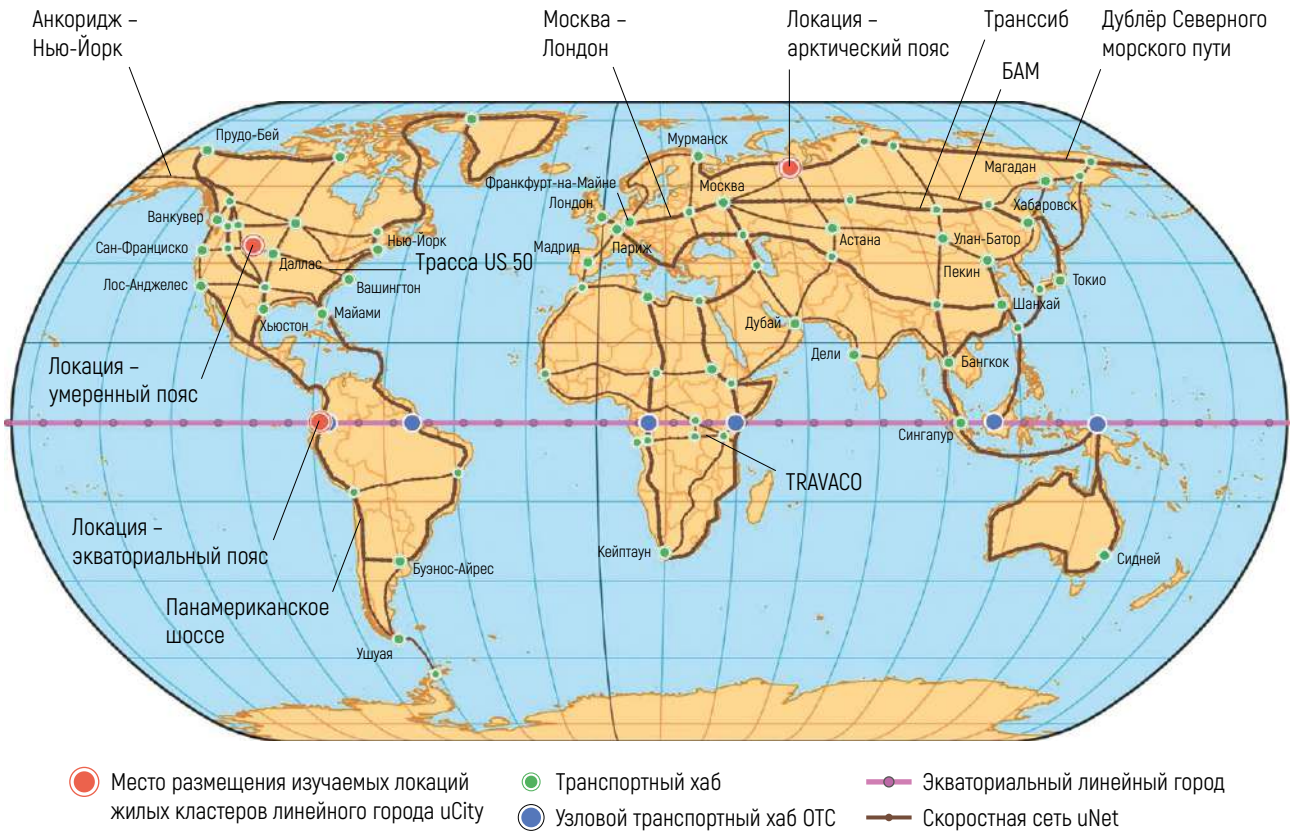


Рисунок 8 – Схема транспортно-инфраструктурной сети uNet (вариант)

Когда говорится о uCity, подразумевается линейная структура расселения и её составные части. В отличие от сложившегося понимания городского планирования в установленных административных границах речь идёт о матрице взаимодействий элементов линейных поселений. Их административная подчинённость определяется в зависимости от политической, социальной, экономической и функциональной целесообразности.

Общие принципы зонирования линейного поселения формируются исходя из удобного и логически оправданного соединения его частей на основе линейной инфраструктуры. Конкретная конфигурация единичных планировочных элементов обусловлена их местом и ролью в общей схеме, а также географической локацией. В некотором смысле город как выделенная административная единица перестаёт существовать. Его границы становятся подвижными, а сам он вытягивается вдоль транспортно-коммуникационных русел урбанизационного каркаса. В такой конфигурации важными являются функциональные элементы этой структуры – кластеры различного назначения.

Понятийно-проблемные комплексы новой урбанистической концепции uCity

Город – это высокоорганизованное сочетание взаимодополняющих элементов, куда входят не только жилые кварталы и сооружения транспорта, но и другие функциональные структуры: производственные и коммунально-складские зоны, инженерные коммуникации; административные, образовательные и медицинские учреждения; парки, скверы и бульвары; территории для спорта и активного отдыха. Концепция линейного расселения позволяет собрать эти части в единую живую структуру.

Понятие «линейный город» введено в профессиональный оборот ещё в конце XIX в. испанским градостроителем А. Сориа-и-Мата, который впервые связал идею расселения с идеей строительства линейных участков инфраструктуры (железные и автомобильные дороги, газопроводы, водопроводы и др.) вдоль оптимальной линии с присоединением иных компонентов города к ней. С тех пор данный принцип эволюционировал в градостроительной практике ряда стран. Линейные города имели концептуальную

привлекательность, но столкнулись с проблемой растянутости коммуникаций. Проект, суливший простые решения для сложных градостроительных задач, сам породил дополнительные трудности.

Тем не менее преимущества линейного расселения можно реализовать. Выделением функциональных частей этой структуры в отдельные самодостаточные планировочные элементы (кластеры uCity) снимается проблема растянутых инженерных коммуникаций, а струнные транспортные системы uST объединят кластеры.

Линейные поселения uCity формируются на основе пяти технологических платформ (таблица 1), разработанных ЗАО «Струнные технологии».

Понятийно-проблемные комплексы для струнных транспортных систем uST приведены в СТБ 2673-2025 «Системы транспортные струнные. Термины и определения» [26], который вступил в силу 1 июля 2025 г.

Содержание новой урбанистической концепции раскрывается через понятийно-проблемные комплексы, приведённые в таблице 2.

Таблица 1 – Технологические платформы, составляющие основу поселений линейного типа uCity

Наименование	Описание, основные задачи
Технологическая платформа «Струнные технологии Юницкого» – uST (англ. – Unitsky String Technologies)	Строительство (вдоль линейных городов uCity) нового вида транспортно-инфраструктурной сети uNet на основе предварительно напряжённых (струнных) конструкций Юницкого. Обеспечивает все необходимые коммуникационные связи: • между объектами (и континентами) на Земле; • между объектами в ближнем космосе, движущимися по круговым экваториальным орбитам; • между объектами на Земле и в ближнем космосе
Технологическая платформа «ЭкоКосмоДом» (ЭКД) (англ. – EcoCosmoHouse – ECH)	Возведение в космосе сооружений с внутренним обитаемым пространством, изолированным от внешней агрессивной космической среды. В ЭКД создана замкнутая экосистема земного типа, включающая искусственно полученную гравитацию, живую плодородную почву, флору и фауну (в том числе микрофлору и микрофауну), атмосферу с регулируемыми параметрами (температура, влажность и др.) для неограниченно длительного, автономного, экокомфортного проживания и деятельности как отдельных людей и их групп, так и многотысячных поселений на экваториальных орбитах планеты, а также в открытом ближнем и дальнем космосе
Технологическая платформа EcoHouse	Экоориентированное строительство на Земле жилых и производственных зданий и сооружений с открытым для внешней природной (биосферной) среды придомовым пространством, заполненным естественной и культурной (органическое земледелие) экосистемами, в которых атмосферные, почвенные и водные параметры регулируются земной природой. Почва из-под зданий при их возведении переносится на крыши и этажи, затем обогащается живым гумусом. Данное озеленение проходит сообразно принципу: любое строительство на планете – это увеличение площади плодородных почв и повышение их плодородия
Технологическая платформа uEnergy	Генерация «зелёной» электрической и тепловой энергии посредством: • специально оборудованных ТЭЦ для экологически чистого сжигания бурых углей, сланцев, торфа и другого сырья органического происхождения с целью выработки живого плодородного гумуса из отходов их горения; • возобновляемых источников энергии – энергии Солнца на Земле и в космосе, а также энергии ветра и морских течений; • пары «водород – кислород» в качестве топливного аккумулятора для решения задач оптимизации энергетической отрасли планеты и космических перевозок
Технологическая платформа uGreen	Органическое земледелие в новой логике воссоздания и интенсификации природных биосферных процессов путём прямого заимствования и использования естественных природных почвенных экосистем со своими микрофлорой, микрофауной и биогеоценозом, а также в логике полного отказа от применения синтетических химикатов (удобрения, средства защиты растений и др.), технологий генной модификации и иных элементов традиционного интенсивного земледелия

Таблица 2 – Понятийно-проблемные комплексы новой урбанистической концепции

Термин	Определение
1	2
Программные элементы новой урбанистической концепции	
Программа «ЭкоМир» [3]:	Программа, предусматривающая развитие экоориентированных биосферных технологий, которые направлены на трансформацию основных сфер земной деятельности человечества: промышленности, инфраструктуры, энергетики, транспорта, сельского хозяйства. Предполагает вынесение вредной части земной индустрии в ближний космос с целью обеспечения равновесия в совершенном мире, представленном триединством БиоМира, ТехноМира и ХомоМира.
• БиоМир [3]	Восстановленная и сбалансированная планетарная, открытая в космос биосферная экосистема, включающая земное человечество, которая более не испытывает антропогенного угнетающего воздействия техносферы Земли и продолжает развиваться по законам эволюционно сложившейся земной живой природы.
• ТехноМир [3]	Вновь созданные индустриальные компоненты: 1) земная индустрия, сформированная на основе новых экоориентированных технологий и состоящая только из необходимых человеку внутри биосферы Земли технологических отраслей; 2) космическая индустрия, включающая вынесенные за пределы биосферы Земли энергозатратные, ресурсоёмкие, экологически вредные и другие отрасли промышленности, которые в условиях космической технологической среды приобретают абсолютное конкурентное ценовое и качественное превосходство; 3) геокосмический транспортный комплекс ОТС, обеспечивающий экологически чистую для земной биосферы транспортно-логистическую связь между земными и космическими компонентами индустриального ТехноМира с грузо-, энерго-, инфо- и пассажиропотоками индустриального масштаба; 4) искусственный интеллект для управления компонентами 1–3 под многоуровневым контролем ХомоМира.
• ХомоМир [3]	Усовершенствованное мировое общественно-политическое устройство, основанное на консолидации международного сообщества биологических людей вокруг единого управляющего центра, аккумулирующего территориальный, финансовый, экономический, научный, кадровый, военный и политический потенциал всех стран-участниц
Геокосмическая программа uSpace [3, 27]	Программа безракетного освоения ближнего космоса с помощью ОТС. Реализация uSpace обеспечит сохранение земной биосферы путём выноса вредной части индустрии (техносферы) за пределы планеты Земля
Структурные элементы глобальной системы расселения	
Глобальная система расселения UniWorld	Комплекс мероприятий, связанных с устройством поселений, размещаемых в линейной фрактальной последовательности вдоль транспортно-инфраструктурной сети uNet как на Земле, так и в ближнем космосе. Представляет собой единый транспортно-инфраструктурный организм, созданный человеческой цивилизацией на основе биосферных инженерных технологий, изложенных в программе «ЭкоМир». Гармонично соединяет ранее возведённые города с новой урбанистикой, снимая накопленные глобальные инфраструктурные, транспортные, энергетические, продовольственные, демографические, экологические и иные противоречия
Космическое индустриальное ожерелье «Орбита» (КИО «Орбита») (англ. – Industrial Space Necklace "Orbit" – ISN "Orbit") [28]	Обслуживающий земное человечество многоорбитальный транспортно-инфраструктурный и индустриально-жилой комплекс, охватывающий планету в плоскости экватора, являющийся функциональным аналогом земного ЭЛГ, размещённым в космосе, а также плацдармом для защиты от космических угроз (в том числе метеоритных) и платформой для экспансии земной цивилизации в дальний космос
Общепланетарное транспортное средство (ОТС) (англ. – General Planetary Vehicle – GPV) [4]	Геокосмический самонесущий летательный аппарат многоразового использования для безракетного индустриального освоения ближнего космоса, выполненный в виде опоясывающего Землю в экваториальной плоскости тора; обеспечивающий индустриальные грузо- и пассажиропотоки с Земли на околоземные экваториальные орбиты и обратно; основанный на единственно возможной (с позиций физики) экологически чистой и с минимальными энергозатратами геокосмической транспортной технологии, использующей только внутренние силы системы и электрическую энергию

Продолжение таблицы 2

1	2
Экваториальный линейный город (ЭЛГ) (англ. – Equatorial Linear City – ELC) [29]	Земной компонент геокосмического транспортно-коммуникационного комплекса, на территории которого размещена взлётно-посадочная эстакада ОТС со всей инфраструктурой, необходимой для осуществления полётов ОТС и обслуживания глобальных геокосмических грузо- и пассажиропотоков. Представляет собой гармонично вписанные в природную среду сухопутных и океанических участков планеты поселения кластерного типа, соединённые трассами uST и размещённые на полосе вдоль экватора
Взлётно-посадочная эстакада общепланетарного транспортного средства (uWay)	Взлётно-посадочный, энергетический и коммуникационный комплекс эстакадного типа для геокосмических перевозок, размещённый вдоль экватора и совмещённый с экопоселением нового поколения
Глобальная схема урбанистического развития	Международный согласованный документ, регулирующий урбанистическое развитие в парадигме градостроительной модели поселений линейного типа программы «ЭкоМир»
Локальная схема урбанистического развития	Локальный (на уровне континента, региона, страны, штата) согласованный документ, регулирующий урбанистическое развитие в парадигме градостроительной модели поселений линейного типа программы «ЭкоМир»
Элементы градостроительной модели поселений линейного типа uCity	
Социальная среда uSocio [30]	Оптимальная социальная среда нового типа для проживания малочисленных групп людей (2000–5000 человек), основанная на методе стратификации. В uSocio благодаря возможности свободного выбора места проживания удовлетворяются социальные потребности: социокультурные связи, общие ценности, религиозные мировоззрения, соблюдение традиций, увлечение искусством, развитие этнических и межэтнических контактов и др.
Линейный город uCity [31]	Пешеходное городское поселение кластерного типа, поверхность земли в котором предназначена для людей, животных и зелёных насаждений. Жилые, административные и индустриальные кластеры застраиваются по технологии EcoHouse. Электрическая и тепловая энергия вырабатывается по технологии uEnergy. Продукты питания выращиваются по технологии uGreen. Транспортные, энергетические и информационные коммуникации размещены на втором уровне по технологии uST. Отсутствует антропогенное угнетающее воздействие на биосферу Земли благодаря высокой эффективности и автономности городского хозяйствования. Обеспечен достойный уровень качества жизни и условий труда для каждого жителя. Организован по принципам uSocio и предоставляет возможности для равного развития всех членов сообщества
ЭкоКосмоДом на планете Земля (ЭКД-Земля) (англ. – EcoCosmoHouse on planet Earth – ECH-Earth) [32]	Земной криптоклиматический комплекс, предназначенный для автономного и неограниченно длительного проживания человеческого поселения расчётной численности. Во внутреннем замкнутом пространстве ЭКД-Земля поддерживаются условия для развития экосистем, имеется совокупность необходимых для этого свойств биосферы планеты, а также моделируются дополнительные технологические процессы, гарантированно обеспечивающие потребности человека
Жилой кластер	Планировочный элемент для размещения зданий жилого, общественного и технического назначения, инженерных сооружений и коммуникаций, элементов благоустройства и озеленения. Фрактально варьируется по всей протяжённости линейной структуры. Соединён транспортно-коммуникационной сетью uST с последовательно чередующимися жилыми и иными кластерами. Обеспечивает технологическую и транспортную доступность всех элементов инфраструктуры для специальных служб

Продолжение таблицы 2

1	2
Наземный индустриальный кластер	Планировочный элемент для наземного базирования отдельных предприятий или их групп. Размещён в соответствии с санитарно-эпидемиологическими и гигиеническими требованиями. Не содержит экологически опасных производств. Учитывает грузооборот и вид обслуживающего транспорта, рациональную взаимосвязь с жилыми территориями, а также вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций и факторы риска, требования гражданской обороны. Оптимально использует территорию в условиях поэтапного строительства. Может выступать как отдельный структурно-планировочный элемент или в составе смешанной застройки
Энергетический кластер	Планировочный элемент, основанный на применении технологий: • пищевой солнечной биоэнергетики (ПСБЭ), предполагающей комплексное потребление и переработку биомассы растений, впитавших энергию Солнца, с целью получения биотоплива, корма для животных и пищи для человека; • реликтовой солнечной биоэнергетики (РСБЭ), применяющей ископаемые бурые угли и горючие сланцы для получения чистой энергии и одновременного образования живого гумуса, необходимого для восстановления плодородия различных типов почв. Базируется на технологической платформе uEnergy. Совмещён с комплексом вертикальных теплиц, использующим технологическую платформу uGreen
Аграрный кластер	Планировочный элемент, включающий: • сельскохозяйственные территории (поля, пастбища и др.); • хозяйственные постройки для содержания животных и техники, многоярусные теплицы. Рационально использует почву открытых и закрытых грунтов. Кратно увеличивает плодородие задействованных участков земли благодаря многоярусной узкостеллажной гумусопонике. Обеспечивает жилые кластеры необходимыми ресурсами для автономного существования. Базируется на технологической платформе uGreen
Научно-исследовательский кластер	Планировочный элемент, включающий: • учреждения, занимающиеся фундаментальной наукой и прикладными исследованиями; • необходимую инженерную и технологическую инфраструктуру, лабораторное оборудование и материалы. Имеет доступ к международным фондам научных исследований и достижений
Образовательный кластер	Планировочный элемент, включающий: • заведения высшего и среднего специального образования; • кампусы для проживания студентов, преподавателей и вспомогательного персонала; • необходимую инфраструктуру с инженерным и учебным оборудованием. Имеет доступ к международным библиотечным фондам и результатам научных достижений
Культурный кластер	Планировочный элемент, включающий: • зрелищные учреждения (театры, концертные залы, кинотеатры и др.); • дворцы, дома и центры культуры; • выставочные павильоны; • площади для размещения художественных мастерских, художественных и балетных училищ; • необходимую инфраструктуру и технологическое оборудование. Имеет доступ к информационным технологиям
Медицинский кластер	Планировочный элемент, включающий: • стационарные медицинские учреждения общего и специализированного назначения; • диагностические центры; • медицинские учебные заведения; • необходимую инфраструктуру с инженерным, медицинским и диагностическим оборудованием. Имеет доступ к специализированным информационным базам

Окончание таблицы 2

1	2
Спортивный кластер	Планировочный элемент, включающий: • крупные спортивные сооружения (стадионы, плавательные бассейны, ипподромы, велотреки и др.); • соответствующую базу для тренировочного процесса и размещения спортивных команд; • необходимую инфраструктуру для содержания сооружений, приёма и обслуживания посетителей соревнований
Рекреационно-развлекательный кластер	Планировочный элемент, включающий: • сооружения для тихого и активного отдыха; • парки аттракционов; • торгово-развлекательные центры; • необходимую инфраструктуру для содержания сооружений, приёма и обслуживания посетителей
Элементы городской инфраструктуры жилого кластера	
Жилые территории	Планировочная структура, включающая: • территории жилой застройки с участками многоквартирной и усадебной застройки; • территории смешанной застройки, в состав которых входят участки застройки, смешанной функционально (общественно-жилая или производственно-жилая) и смешанной пространственно (многоквартирная и усадебного типа)
Общественный центр	Планировочная структура, включающая: • многофункциональное здание-доминанту со встроенной станцией рельсо-струнной транспортной системы uST; • комплекс социального обслуживания (учреждения дошкольного, общего среднего и дополнительного образования, воспитания, социального и медицинского обслуживания, торговли и общественного питания, бытового и коммунального обслуживания, связи, спортивные сооружения, а также кредитно-финансовые, зрелищные и культурно-просветительские учреждения)
«Горизонтальный небоскрёб»	Жилой комплекс, включающий сблокированные одноквартирные дома с приусадебными участками и общей кровлей, пространство которой используется под оранжерею или теплицу для выращивания и первичной переработки сельхозпродукции. Базируется на технологической платформе EcoHouse
Пешеходные пути	Непрерывная сеть благоустроенных пешеходных связей жилого кластера, включающая: • тротуары улиц различного функционального назначения; • пешеходные дорожки на межуличных и внутриобъектных территориях; • аллеи, бульвары, пешеходные улицы и площади; • надземные, наземные и подземные пешеходные переходы через транспортные коридоры, иные препятствия (реки, овраги и др.)
Элементы природно-экологического каркаса	Составляющие единой системы открытых и озеленённых пространств. Включают озеленённые территории населённого пункта и пригородных зон. Предназначены для организации рекреационной деятельности и улучшения состояния окружающей среды, в том числе с учётом адаптации к изменению климата. Имеют удобные пешеходные и транспортные связи с жилыми и общественно-деловыми территориями населённого пункта

Понятийно-проблемные комплексы во всей полноте будут сформированы на стадиях глобальной реализации новой урбанистической концепции. В настоящей работе раскрыты основные термины и определения исследуемого вопроса.

Заключение

Анализ отечественного и зарубежного опыта в области градостроения показал актуальность единых подходов в сфере урбанистики. Усилия по внедрению комплекса экоориентированных технологий, описанных в программе

«ЭкоМир», приведут к прогнозируемому улучшению градостроительных решений посредством организации жизнеспособных и экологически устойчивых структур расселения в новой урбанистической концепции uCity, реализация которой предусматривает подготовку общей нормативной базы с соответствующим понятийно-проблемным комплексом.

Природная среда влияет на планировку, функционирование и эволюцию жилых территорий. Предложенная модель поселений линейного типа uCity на основе транспортно-инфраструктурной сети uNet и принципа «спонтанной самоорганизации» придаёт городской системе устойчивость к стрессам и адаптивность к изменениям. Самоорганизация предполагает социально-территориальную структуризацию населения, которая должна осуществляться с помощью специалистов согласно теории социальной среды uSocio.

Дальнейшие направления работы: исследование приёмов и методов планировочной и функциональной организации жилых кластеров в различных климатических условиях; сосредоточение особого внимания на изучении проблемы проектирования криптоклиматических комплексов; формирование полноценного понятийно-проблемного комплекса новой урбанистической концепции для его имплементации в нормативные правовые базы стран, заинтересованных в реализации положений программы «ЭкоМир».

Список основных источников

1. *Кодекс Республики Беларусь об архитектурной, градостроительной и строительной деятельности: 17 июля 2023 г. № 289-З: принят Палатой представителей 28 июня 2023 г.: одобр. Советом Респ. 30 июня 2023 г.: в ред. Закона Респ. Беларусь от 28 июня 2024 г. № 15-З // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=Hk2300289 (дата обращения: 03.02.2025).*
2. *Витюк, Е.Ю. В поисках идеального города / Е.Ю. Витюк // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2009. – № 2. – С. 67–72.*
3. *Юницкий, А.Э. Программа «ЭкоМир» / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 24–77.*
4. *Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А.Э. Юницкий. – Силакрогс: ПНБ принт, 2019. – 576 с.*
5. *Юницкий, А.Э. Цивилизационная ёмкость космического дома по имени Планета Земля / Анатолий Юницкий. – Минск, 2021. – 148 с.*
6. *Юницкий, А.Э. Программа перезагрузки экономики Союзного государства России и Беларуси на биосферный путь цивилизационного развития / А.Э. Юницкий. – Минск, 2022. – 132 с.*
7. *68 % of the World Population Projected to Live in Urban Areas by 2050, Says UN // United Nations. – URL: https://www.un.org/en/desa/68-world-population-projected-live-urban-areas-2050-says-un (date of access: 12.02.2025).*
8. *Потаев, Г.А. Градостроительство в Республике Беларусь в XXI веке: ориентиры развития / Г.А. Потаев // Academia. Архитектура и строительство. – 2021. – № 2. – С. 29–35.*
9. *Павлова, Г. Развитие полицентрической агломерации г. Минска / Г. Павлова // UNECE. – URL: https://unece.org/fileadmin/DAM/hlm/prgm/hmm/sustainable_housing/armenia/presentations/day_1/session2_3_Belarus_Pavlova.pdf (дата обращения: 03.03.2025).*
10. *Соболев, С.А. Усиление агломерационных процессов в пространственном развитии: теория и практика / С.А. Соболев // Вестник Московского университета. Серия 21: Управление (государство и общество). – 2022. – № 4. – С. 61–85.*
11. *Смоляр, И.М. Терминологический словарь по градостроительству / И.М. Смоляр. – М.: РОХОС, 2004. – 160 с. – (Теоретические основы градостроительства).*
12. *Кожевников, С.А. Пространственное и территориальное развитие Европейского Севера России: тенденции и приоритеты трансформации / С.А. Кожевников // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2019. – Т. 12, № 6. – С. 91–109.*
13. *Спиридонов, В.Ю. Концепция эволюции теории расселения / В.Ю. Спиридонов // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2011. – № 1. – С. 14–20.*
14. *Набиуллина, К.Р. Инновационные практики управления градостроительным развитием в США / К.Р. Набиуллина // Общество: политика, экономика, право. – 2018. – № 11 (64). – С. 51–54.*
15. *Крашенинников, А.В. Градостроительное развитие жилой застройки: исследование опыта западных стран: учеб. пособие / А.В. Крашенинников. – М.: Архитектура-С, 2005. – 112 с., ил.*

16. *US Route 50 Map // Maptrove. – URL: https://www.maptrove.com/us-route-50-map.html (date of access: 09.04.2025).*
17. *Arctic States // Arctic Council. – URL: https://arctic-council.org/about/states/ (date of access: 10.03.2025).*
18. *Благодетелева, О.М. Эволюция и современные тенденции развития систем расселения в районах Севера (на примере США, Канады и России) / О.М. Благодетелева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2017. – № 3 (27). – С. 5–25.*
19. *Ecuador – Urbanization 2013–2023 // Statista. – URL: https://www.statista.com/statistics/455817/urbanization-in-ecuador/ (date of access: 21.03.2025).*
20. *Панамериканское шоссе: где начинается и где заканчивается самая длинная дорога мира // IXBT LIVE. – URL: https://www.ixbt.com/live/travel/panamerikanskoe-shosse-gde-nachinaetsya-i-gde-zakanchivaetsya-samaya-dlinnaya-doroga-mira.html?ysclid=m8n63wfv5t18987596. – Дата публ.: 28.01.2025.*
21. *27 Bad Maps That Won't Help You Out in Any Way at All // Thunder Dungeon. – URL: https://thunderdungeon.com/2024/12/04/bad-maps/ (date of access: 24.03.2025).*
22. *Wolfram, S. A New Kind of Science / S. Wolfram. – Champaign: Wolfram Media, 2002. – 1280 p.*
23. *Alexander, C. The Nature of Order: An Essay on the Art of Building and the Nature of the Univerce: in 4 books / C. Alexander. – Berkeley: The Center for Environmental Structure Publishing, 2004. – Book 4: The Luminous Ground. – 356 p.*
24. *Тарасова, Л. Градостроительное планирование и регулирование развития крупных городов с учётом действия процессов самоорганизации / Л. Тарасова // Городское управление. – 2010. – № 7. – С. 36–56.*
25. *The Meaning of Emergent Urbanism, After A New Kind of Science // Emergent Urbanism. – URL: http://emergenturbanism.com (date of access: 07.04.2025).*
26. *Системы транспортные струнные. Термины и определения = Сістэмы транспартныя струнныя. Тэрміны і азначэнні: СТБ 2673-2025. – Введ. 01.07.2025. – Минск: Госстандарт: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2025. – IV, 36 с.*
27. *Роль геокосмического транспорта в крупномасштабной индустриализации космоса / А.Э. Юницкий, Д.А. Исаев, В.Л. Лукша [и др.] // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2023. – Т. 23, № 3. – С. 39–50.*
28. *Общепланетарное транспортное средство и космическое ожерелье «Орбита» как альтернатива ракетному освоению околоземного пространства / А.Э. Юницкий, С.А. Пронкевич, С.В. Артюшевский, В.Л. Лукша // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2021. – Т. 22, № 4. – С. 364–372.*
29. *Юницкий, А.Э. Экваториальный линейный город: особенности строительства / А.Э. Юницкий, М.М. Давыдик // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы IV междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 18 сент. 2021 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2022. – С. 101–115.*
30. *Юницкий, А.Э. Структура социального пространства жилой среды нового типа: предпосылки, развитие, стратификация / А.Э. Юницкий, М.М. Давыдик // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 428–437.*
31. *Юницкий, А.Э. Градостроительная модель линейного типа как выход из цивилизационного и урбанизационного тупиков / А.Э. Юницкий, М.М. Давыдик // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы IV междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 18 сент. 2021 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2022. – С. 87–99.*
32. *Организация внутреннего пространства ЭкоКосмоДома на планете Земля / А.Э. Юницкий, Е.В. Ермачёк, И.В. Налётов, В.А. Платонова // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы III междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 12 сент. 2020 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2021. – С. 332–343.*

УДК 332.1+629.7

Социально-экономические эффекты от внедрения урбанистической концепции «Линейный город uCity»

А.Э. Юницкий[1,2]
доктор философии транспорта

Е.Н. Власовец[2]

О.В. Кулик[2]

А.С. Шанчук[2]

[1] ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

[2] ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

Глобальные вызовы современности, обусловленные масштабным антропогенным воздействием на биосферу, требуют эффективных механизмов их преодоления. К числу таких вызовов относятся: изменение климата, деградация окружающей среды, истощение природных ресурсов, урбанистический кризис, социальное неравенство и несостоятельность традиционных моделей развития.

Одним из перспективных направлений решения обозначенных вопросов является разработанная А.Э. Юницким инновационная урбанистическая концепция «Линейный город uCity», способная обеспечить гармоничное сосуществование человека и окружающей среды. Реализация данного проекта позволит минимизировать экологический след, оптимизировать пространственное, энергетическое и инфраструктурное развитие, а также сформировать условия для повышения социального благополучия и устойчивого экономического роста.

Цель работы – обоснование необходимости перехода к устойчивой модели развития человечества через внедрение инновационной урбанистической концепции «Линейный город uCity», а также определение и систематизация эффектов, которые охватывают ключевые направления социально-экономического, экологического и технологического развития, образуют ценностную значимость этой концепции и подтверждают её актуальность для нашей цивилизации.

Особое внимание уделено роли проекта «Линейный город uCity» как одного из главных элементов геокосмической транспортной системы, интегрируемой в контекст индустриализации ближнего космоса – стратегически важного вектора цивилизационного научно-технического прогресса.

По результатам исследования подтверждена ценностная значимость урбанистической концепции «Линейный город uCity», основанная на выявленных разнонаправленных эффектах, что позволяет рассматривать данный проект не только в качестве прогрессивной модели организации городского пространства, но и как инструмент комплексной трансформации среды обитания человечества, ориентированный на принципы устойчивого развития и расширение технологических горизонтов цивилизации.

Ключевые слова:
геокосмическая транспортная система, космогенная земная цивилизация, линейный город uCity, общепланетарное транспортное средство (ОТС), система ценностной значимости, урбанистическая концепция, ЭкоМир.

UDC 332.1+629.7

Socioeconomic Effects of Implementing Urban Linear uCity Framework

A . Unitsky[1, 2]
Dr. of Philosophy
in Information Technologies
(Transport)

K. Vlasavets[2]

O. Kulik[2]

A. Shanchuk[2]

[1] Astroengineering Technologies LLC,
Minsk, Belarus

[2] Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

The global challenges of today, caused by large-scale human impact on the biosphere, require effective mechanisms to overcome them. These challenges include climate change, environmental degradation, depletion of natural resources, urban crisis, social inequality, and the failure of traditional development models.

One promising approach to addressing these challenges is the innovative urban Linear uCity framework developed by A. Unitsky, which aims to ensure the harmonious coexistence of humans and the environment. The implementation of this concept has the potential to minimize the ecological footprint, optimize spatial, energy, and infrastructure development, and create favorable conditions for enhancing social well-being and achieving sustainable economic growth.

The aim of this study is to substantiate the need to transition to a sustainable model of human development through the implementation of the innovative urban Linear uCity framework, as well as to identify and systematize its effects across key socioeconomic, environmental, and technological areas. These effects collectively define the value significance of the concept and confirm its relevance to contemporary civilization.

Particular attention is paid to the role of the Linear uCity project as one of the main elements of the geocosmic transport system, integrated into the context of near space industrialization – a strategically important vector of civilizational scientific and technological progress.

The results of the study confirm the significance of the urban Linear uCity framework, based on the identified multidirectional effects. This makes it possible to consider the concept not only as a progressive model of urban spatial organization, but also as a tool for the comprehensive transformation of the human environment, oriented toward the principles of sustainable development and the expansion of civilization's technological horizons.

Keywords:
cosmogenic terrestrial civilization, EcoSpace, General Planetary Vehicle (GPV), geocosmic transport system, linear uCity, urban framework, value significance system.

Введение

На современном этапе развития человечество приблизилось к историческому рубежу, на котором достижения науки и техники, некогда символизировавшие прогресс, становятся одновременно источником беспрецедентных возможностей и глобальных проблем. Масштабное развитие технологий, часто без должного учёта их воздействия на природу и общество, привело к глубоким системным кризисам: истощению природных ресурсов, экологическим катастрофам, социально-политической нестабильности, а также к неравномерности экономического развития стран. Данная проблематика уже давно вышла за пределы отдельных государств и регионов, превратившись в вызовы планетарного масштаба, решение которых требует комплексного подхода, скоординированных действий и активного международного сотрудничества [1].

Важный шаг на пути к преодолению указанных трудностей – принятие международного документа «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года», одобренного на Саммите ООН 25 сентября 2015 г. В нём сформулированы 17 глобальных целей устойчивого развития, направленных на урегулирование ключевых проблем современности – от ликвидации бедности до сохранения экосистем и борьбы с изменениями климата [2]. Эти цели стали абсолютным призывом к действию, объединяющим страны, организации и граждан в стремлении к справедливому и устойчивому будущему.

Однако для выполнения столь амбициозных и масштабных задач недостаточно лишь политической воли и традиционных экономических инструментов. Требуется фундаментальное переосмысление самой парадигмы человеческого развития и переход к новым моделям социально-цивилизационного и технологического прогресса.

Одним из путей преодоления текущих вызовов видится реализация концепции космотехногенной земной цивилизации, в рамках которой Земля и космос рассматриваются как единое пространство для жизнедеятельности человека. В этой новой парадигме освоение ближнего космоса выходит за рамки инженерных задач – оно становится технологическим прорывом и стратегической необходимостью для обеспечения устойчивого и гармоничного будущего всего человечества.

Идея устранения вредного антропогенного воздействия на биосферу отражена в фундаментальной программе «ЭкоМир», разработанной инженером А.Э. Юницким. «ЭкоМир» представляет собой масштабную концепцию, направленную на решение глобальных экологических и ресурсных проблем Земли посредством переноса значительной части промышленного производства в ближний космос [3].

Согласно данной программе технологический цивилизационный фундамент, призванный обеспечить комплекс условий для устойчивого развития человечества, основан на сложном взаимодействии биосферы (БиоМир), уже освобождённой от антропогенного угнетающего воздействия, техносферы (ТехноМир) – созданной на Земле и в космосе ресурсо- и энергоэффективной индустриальной составляющей, а также социосферы (ХомоМир) – усовершенствованного мирового общественно-политического устройства. Триединством БиоМира, ТехноМира и ХомоМира выступает новая цивилизационная парадигма – урбанистическая концепция «Линейный город uCity», которая образует комплекс оптимальных условий для устойчивого роста и дальнейшего развития техногенной земной цивилизации в космическом направлении. Являясь частью геокосмической программы, линейный город формирует материальный фундамент для стабильного урбанистического развития, где человек, природа и технологии сосуществуют в сбалансированной экосистеме.

В связи с вышеизложенным цель данной работы – обоснование актуальности реализации урбанистической концепции «Линейный город uCity», а также определение разнонаправленных эффектов, возникающих при её практическом внедрении и формирующих научно-практическую базу для перехода к новой парадигме устойчивого развития человечества.

Практические шаги на пути к новому устройству мира

Практическим шагом на пути к переустройству существующего биосферного порядка является освоение космоса как нового вектора индустриального развития. Космическая индустриализация выступает главным этапом прогресса земной цивилизации, открывая широкие перспективы для динамичного и гармоничного развития.

Реализация столь масштабной задачи становится возможной благодаря внедрению инновационной геокосмической транспортной системы, отвечающей всем фундаментальным законам природы и основанной на эксплуатации общепланетарного транспортного средства (ОТС) [4].

Создание ОТС предполагает формирование развитой сопутствующей инфраструктуры, необходимой для выполнения полётов и обслуживания глобальных геокосмических грузопассажирских потоков: взлётно-посадочной эстакады

ОТС с инженерными и коммуникационными сетями, расположенной в экваториальной плоскости Земли; комплексов астронавигации и автоматизированного управления; производственных кластеров по сборке, обслуживанию и ремонту узлов ОТС; энергетических кластеров, обеспечивающих энергией все части геокосмического комплекса и процессы взлёта и посадки ОТС; иного.

Однако для устойчивой работы геокосмической транспортной системы недостаточно наличия высокотехнологичной производственно-инженерной базы. Необходимое условие – строительство развитой социальной инфраструктуры, включающей жилые комплексы, административные центры, образовательные учреждения, культурные объекты и другие социально значимые урбанистические элементы. Они должны не только выполнять утилитарную функцию обеспечения жизнедеятельности и профессиональной активности специалистов, задействованных в эксплуатации ОТС, но и стать центрами социальной, культурной и образовательной активности, обуславливающими стабильность и самодостаточность среды проживания.

Оптимальной формой организации данной инфраструктуры является инновационная урбанистическая концепция «Линейный город uCity», разработанная в рамках программы «ЭкоМир» и направленная на создание устойчивой городской среды, предопределяющей высокое качество жизни населения, а также комфортные условия труда. Именно эта концепция лежит в основе реализации одного из важнейших земных компонентов геокосмического комплекса – экваториального линейного города (ЭЛГ).

Урбанистическая концепция «Линейный город uCity»

Линейный город uCity представляет собой совокупность кластерных поселений, гармонично интегрированных в природные экосистемы как на суше, так и на воде [5]. Все кластеры связаны между собой транспортной инфраструктурой «второго уровня» – сетью скоростных (до 150 км/ч), высокоскоростных (до 360 км/ч), ультраскоростных (до 600 км/ч) и гиперскоростных (более 600 км/ч) транспортных комплексов на основе технологии Струнного транспорта Юницкого (uST), обеспечивающих быстрое и комфортное перемещение пассажиров и грузов [3].

Концепция «Линейный город uCity» базируется на экологически ориентированных технологиях и принципах организации техносферы, которые исключают антропогенное разрушающее воздействие на биосферу:

- uGreen – технологическая модель органического земледелия, предполагающая воссоздание и усиление естественных биосферных процессов для снабжения жителей линейного города натуральными (органическими) продуктами питания с учётом локальных продовольственных потребностей. Модель uGreen исключает применение синтетических химических веществ (удобрения и пестициды), технологий генной модификации, а также иных элементов, характерных для коммерческого интенсивного сельского хозяйства. Определённые природные механизмы могут быть целенаправленно активированы посредством использования природных органических удобрений uTerra для восстановления плодородия почв и предотвращения их деградации;
- uEnergy – совокупность биосферных технологий по выработке экологически чистой электрической и тепловой энергии, обеспечивающих энергетическую безопасность всех структурных элементов линейного города. Биосферная энергия генерируется специализированными теплоэлектростанциями, которые функционируют на органических видах топлива с последующим получением живого плодородного гумуса из утилизированных отходов горения; применяют возобновляемые источники энергии, включая солнечную энергию (как наземную, так и космическую), энергию ветра и морских течений; задействуют пару «водород – кислород» в качестве топливного аккумулятора для оптимизации энергетической отрасли планеты и космических перевозок;
- uST – инженерные решения на основе предварительно напряжённых (рельсо-струнных) конструкций, обеспечивающие формирование транспортно-коммуникационных сетей линейного города посредством создания транспортных комплексов в эстакадном исполнении для реализации скоростных и высокоскоростных грузопассажирских перевозок;
- EcoHouse – технология строительства экоориентированных жилых, производственных и иных зданий и сооружений, интегрированных в открытую природную (биосферную) среду. В регионах с экстремальными природно-климатическими условиями здания и сооружения проектируются как автономные замкнутые экосистемы, воссоздающие ключевые функции биосферы, необходимые для нормальной жизнедеятельности человека (переработка веществ и энергии, саморегуляция, адаптивность, сохранение биоразнообразия).

Вышеперечисленные экоориентированные технологии лежат в основе автономных, архитектурно и функционально

сбалансированных структурных единиц линейного города (рисунок 1).

Рисунок 1 – Фундаментальные составляющие урбанистической концепции «Линейный город uCity»

Автономные структурные единицы линейного города uCity:

• производственный кластер – территория, предназначенная для размещения предприятий промышленного сектора, в том числе организаций агропромышленного комплекса, заводов по производству экологически чистых удобрений, переработке отходов и др. При расположении линейного города в экваториальной зоне, вдоль стартовой эстакады ОТС, в структуру данного кластера включают не только промышленные, но и технические объекты для обслуживания и ремонта узлов и агрегатов взлётно-посадочной эстакады ОТС;

• энергетический кластер – часть линейного города, предназначенная для генерации, аккумуляции и распределения выработанной энергии. Кластер формирует устойчивую систему энергетической безопасности, обеспечивающую бесперебойное функционирование каждой структурной единицы линейного города, не оказывая негативного воздействия на окружающую среду. При размещении линейного города в экваториальной зоне, вдоль стартовой эстакады ОТС, энергетические кластеры будут осуществлять энергоснабжение всех элементов геокосмического комплекса, а также процессов взлёта и посадки ОТС;

• участки глобальной транспортной сети uST – транспортно-инфраструктурные комплексы uST эстакадного типа, включая сопутствующую транспортную инфраструктуру (пересадочные узлы, логистические центры, грузовые и пассажирские терминалы и др.), предназначенные для регионального и межконтинентального сообщения, а также для связи между структурными единицами линейного города;

• жилой кластер – автономная территория, представляющая собой пешеходное поселение, организованное по принципу объединения жилых домов в одну многофункциональную систему – многоквартирный «горизонтальный небоскрёб» длиной 400–500 м и более.

Жилые здания различной этажности расположены внутри кластера с учётом удобного пешего доступа населения ко всем объектам социально значимой инфраструктуры, необходимым для работы, отдыха и повседневной деятельности. При этом производственные участки, являющиеся основными центрами занятости, вынесены за пределы жилого кластера, что способствует сохранению экологически чистой среды проживания.

Высокий уровень мобильности в жилых кластерах обеспечивается за счёт размещения в каждом из них здания-доминанты, в архитектуру которого интегрированы транспортно-пересадочные узлы скоростной транспортной системы uST, а также объекты коммерческого и социокультурного назначения.

Строительство инфраструктурных объектов жилого кластера осуществляется по принципу минимизации антропогенного воздействия на окружающую среду, что не только исключает деградацию природных ресурсов, но и способствует увеличению площади плодородных земель и повышению их качества. В частности, извлекаемый в ходе возведения зданий и сооружений плодородный почвенный слой не утилизируется, а перераспределяется на эксплуатируемые кровли «горизонтального небоскрёба» и иных строений кластера, где впоследствии обогащается органическими удобрениями и используется для сельскохозяйственного производства экологически чистой продукции.

Эксплуатируемые крыши домов оборудованы под размещение теплиц или оранжерей, что позволяет организовать полноценные зоны для выращивания высокопродуктивных культур и создать замкнутую экосистему с возможностью круглогодичного ведения эффективного земледелия. Такой подход обеспечит продовольственную безопасность и постоянный доступ жителей линейного города к качественной пище.

Выращивание и потребление продуктов питания в шаговой доступности внутри кластера базируется на принципе

безотходности, что формирует биологически замкнутую циклическую систему. По завершении сельскохозяйственного цикла вместо отходов образуется биогумус, который в виде органических удобрений возвращается в почву (в том числе на эксплуатируемые крыши домов), способствуя восстановлению её плодородия и поддержанию физико-химических свойств.

Субъектами хозяйственной и культурной деятельности в жилых кластерах линейного города выступают общины численностью от 2000 до 10 000 человек. Основные виды занятости населения: обеспечение функционирования кластерной инфраструктуры, производство экологически чистых продуктов питания, воспитательно-образовательная, научно-техническая и исследовательская деятельность, а также предоставление услуг и реализация индивидуальных духовных и физкультурно-оздоровительных практик [6].

Функциональная и структурная целостность, взаимосвязанная организация пространства внутри и снаружи жилого кластера позволит поселению эффективно существовать самостоятельно даже в удалённых и труднодоступных районах, сохраняя при этом высокий уровень жизни.

Принципы урбанистической концепции линейного города дают возможность естественным образом адаптировать архитектурную застройку к любым географическим и природно-климатическим условиям местности, в том числе к регионам экваториальной зоны. Применение транспортных систем «второго уровня» эффективно решает проблемы, связанные со сложностью природно-географического рельефа, обеспечивает свободный доступ к объектам инфраструктуры линейного города. В результате ранее изолированные и труднодоступные участки превращаются в удобные, благоустроенные и привлекательные пространства.

Созданный в рамках рассматриваемой концепции линейный город – это симбиоз природы и урбанистики, где жильё, административные и производственные зоны объединены в функциональную систему, рационально использующую пространство и гарантирующую экологическую, энергетическую и продовольственную безопасность.

Анализ ценностной значимости урбанистической концепции «Линейный город uCity»

Технологии и принципы, заложенные в основу урбанистической концепции «Линейный город uCity», учитывают интересы биосферы, техносферы и социосферы, обеспечивая их сбалансированное развитие в долгосрочной перспективе. Взаимно дополняя друг друга, при комплексном применении они создают качественно новую, цивилизационно существенную синергию и способствуют переходу к устойчивой и гармоничной эволюции человечества.

Линейный город, реализуемый на межконтинентальном и/или межрегиональном уровне, формирует глобальную инфраструктурную систему, что позволяет говорить не только о локальных преобразованиях отдельных регионов, но и о масштабном влиянии концепции на социально-экономическое развитие всего мирового сообщества [7].

Анализ ценностной значимости реализации концепции линейного города заключается в выявлении различных эффектов в следующих направлениях: пространственно-инфраструктурное и транспортно-коммуникационное развитие, обеспечение продовольственной и энергетической безопасности, развитие социокультурной среды, а также эффектов в рамках мировой экономической системы (рисунок 2).

Рисунок 2 – Направления формирования эффектов в системе ценностной значимости реализации концепции «Линейный город uCity»

Эффекты в рамках пространственно-инфраструктурного развития:

- формирование устойчивой инфраструктурной безопасности за счёт применения принципиально новой системы

расселения, отличной от традиционного градостроительства, как платформы для самоорганизации локальных сообществ. Инфраструктурные решения рассматриваемой урбанистической концепции, основанные на использовании экологически чистых, энергоэффективных и технически устойчивых коммуникационных систем, позволят обеспечить жильём население планеты и гарантировать сбалансированное территориальное развитие;

• создание в каждой кластерной единице линейного города устойчивой автономной системы жизнеобеспечения, поддерживающей экологическое равновесие в симбиозе с преимуществами развитой инфраструктуры и современных цивилизационных технологий;

• построение нового типа экологически ориентированной пространственно-инфраструктурной системы, где приоритетным является сохранение природного капитала, климатической стабильности и биологического разнообразия. Это позволит переосмыслить основы урбанизации как механизма цивилизационного роста, совместимого с долгосрочным экологическим балансом на планете.

Эффекты в рамках транспортно-коммуникационного развития:

• достижение высокого уровня транспортной безопасности за счёт возведения разветвлённых высокопроизводительных транспортно-инфраструктурных сетей uST, адаптированных к эксплуатации в любых природно-климатических условиях. Доступ к транспортной сети будет организован для существующих и вновь построенных поселений, в том числе на территориях, где транспортная доступность осложнена климатическими и ландшафтными особенностями;

• формирование значительного экономического эффекта от создания и функционирования транспортной сети uST нового поколения. Низкая ресурсо- и энергоёмкость комплексов uST обеспечит экономию строительных материалов – более 10 млрд тонн по сравнению с традиционными транспортными системами, а также ежегодную экономию условного топлива в процессе эксплуатации uST – более 1 млрд т/год [8];

• снижение эмиссии загрязняющих веществ за счёт функционирования экологически безопасной глобальной электрифицированной транспортно-логистической системы uST, что обусловит ежегодное сокращение выбросов вредных веществ более чем на 10 млрд тонн (около 20 % от общего объёма мировых выбросов парниковых газов [9]), тем самым способствуя борьбе с кардинальным изменением климата;

• организация безопасной урбанистической среды благодаря снижению техногенного риска ввиду изменения парадигмы мобильности, заложенной в концепцию линейного города: полное функциональное и пространственное разделение транспортных потоков и пешеходного движения, позволяющее существенно уменьшить количество ДТП, в которых ежегодно погибают более 1,2 млн человек, а 20–50 млн получают травмы и увечья [10].

Эффекты в рамках продовольственной безопасности:

• повышение качества продуктов питания вследствие перехода к устойчивым формам сельскохозяйственного производства, которое базируется на принципах органического земледелия, исключающего применение химических удобрений, пестицидов, агрохимикатов и генетически модифицированных организмов;

• рост урожайности благодаря использованию высокоплодородного биогумуса, что позволит обеспечить возводимые линейные города достаточным количеством экологически чистых продуктов питания, производимых в шаговой доступности.

Эффекты в рамках энергетической безопасности:

• создание инновационного топливно-энергетического комплекса на основе возобновляемых биоресурсов, имеющего суммарную мощность генерации около 10 млрд кВт и гарантирующего полную энергетическую автономность всех элементов замкнутой экосистемы кластеров линейного города, а также компонентов геокосмического комплекса [11];

• снижение экологической нагрузки на окружающую среду посредством внедрения технологии реликтовой солнечной биоэнергетики, которая отвечает принципам климатической нейтральности, энергоэффективности и экологической устойчивости и предполагает гармонию между развитием энергетического сектора и сохранением биосферы Земли.

Эффекты в сфере социокультурного развития:

• улучшение качества жизни и устойчивый рост доходов населения за счёт организации благоприятной социальной среды и расширения эффективной занятости, предусматривающей максимальное вовлечение трудоспособного населения в экономическую деятельность, увеличение результативности использования трудового потенциала;

• формирование и развитие человеческого капитала стран через приоритетное инвестирование в образование, здравоохранение, науку и культуру;

• повышение социальной активности населения за счёт расширения возможностей для самореализации, вовлечения в процессы развития кластерной инфраструктуры, участия в жизни локальных сообществ и включения в социально-экономические процессы.

Эффекты, достигаемые в рамках отдельных направлений, служат основой для получения комплексных и системных результатов как на уровне отдельных экономик стран, вовлечённых в реализацию концепции «Линейный город uCity», так и в рамках мировой экономической системы.

Эффекты в мировой экономической системе:

• обеспечение полной занятости в структуре мирового хозяйства, исключение проблемы трудоустройства населения за счёт устранения барьеров, ограничивающих профессиональную и территориальную мобильность, а также создание новых рабочих мест в промышленных секторах, локализованных в производственных кластерах линейного города, в том числе в сфере эксплуатации, обслуживания и развития геокосмического транспортного комплекса;

• инвестиционное развитие экономики посредством привлечения капитала в проекты, ориентированные на формирование инновационно-технологических кластеров, организацию научно-исследовательских центров, образовательных учреждений, а также объектов социальной, экологической и институциональной инфраструктуры;

• усиление глобализационных и интеграционных процессов, а также международной производственной кооперации как ключевых механизмов повышения производительности труда, ускоренной технологической модернизации и освоения наукоёмкой продукции с высокой добавленной стоимостью;

• увеличение доходной части бюджета государств, обусловленное расширением налоговой базы в связи с развитием высокотехнологичных производств, научных и образовательных центров, а также инфраструктуры для высокоинтеллектуальных видов деятельности, включая научно-технологические парки и инновационные кластеры.

Заключение

Проведённый анализ урбанистической концепции «Линейный город uCity», принципиально отличной от традиционных моделей расселения, сочетающей экологически ориентированные технологии и принципы организации пространства и исключающей антропогенное разрушающее воздействие на биосферу, позволяет сделать вывод о том, что данная система формирования жизненной среды может стать фундаментальной основой для масштабной социально-экономической трансформации, необходимой для обеспечения устойчивого развития и существования человеческой цивилизации.

Представленная в виде совокупности разнонаправленных эффектов система ценностной значимости концепции «Линейный город uCity» подтвердила, что внедрение указанного проекта способно стать важным шагом для преодоления глобальных вызовов и актуальных проблем человечества, таких как изменение климата, загрязнение окружающей среды, утрата биоразнообразия и истощение мировых ресурсов, бедность и неравенство.

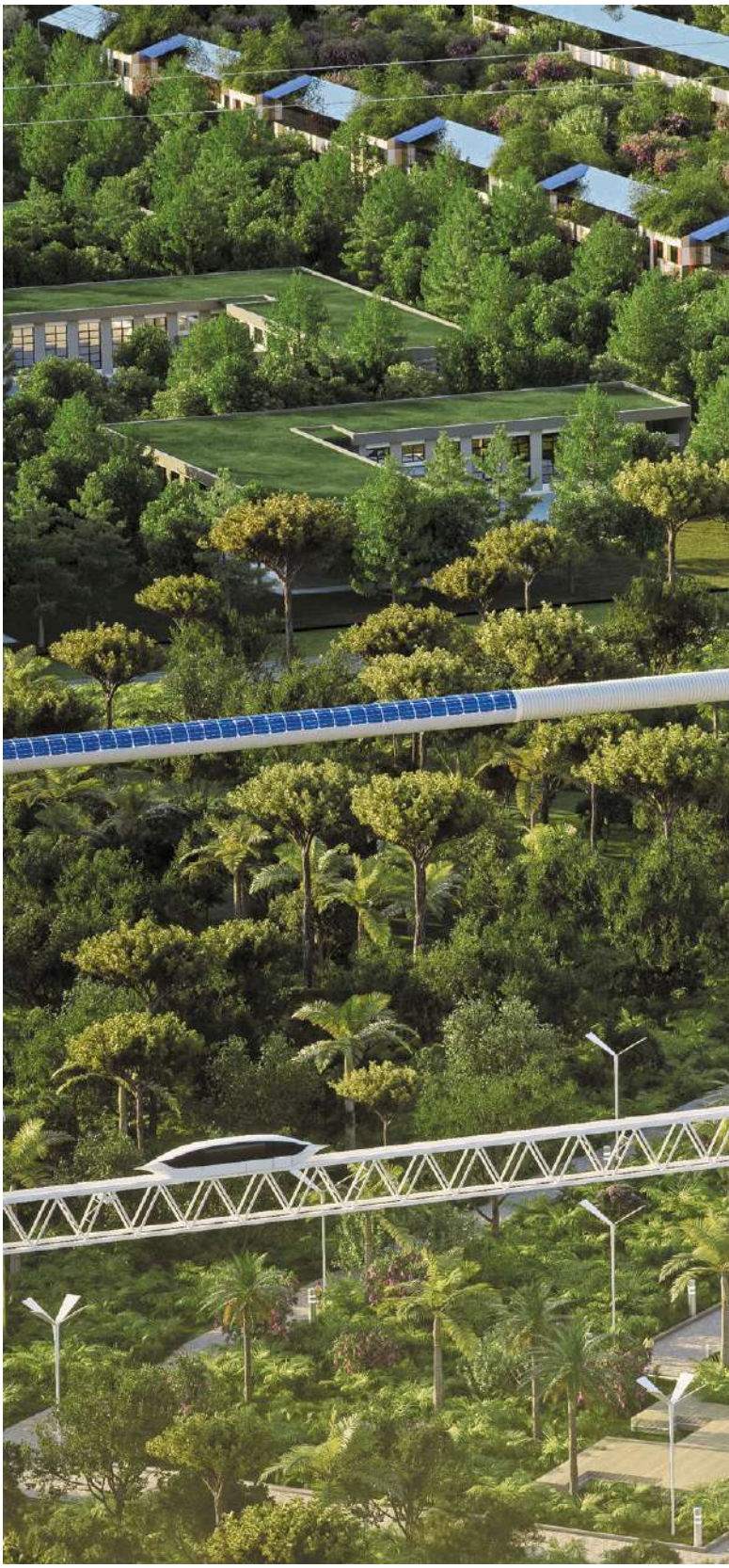
Детальный анализ всех функциональных единиц линейного города даёт возможность заключить, что данные структурные элементы, являясь автономной системой, гарантируют безопасность жизнедеятельности даже в условиях внешней нестабильности, обеспечивая устойчивость к техногенным, экологическим и социальным рискам, а также выступают основополагающей предпосылкой для качественно нового этапа развития человечества и формирования самодостаточной устойчивой модели городской среды будущего.

Список основных источников

1. *Antyufeev, A.V. Linear Cities: Controversies, Challenges and Prospects / A.V. Antyufeev, O.A. Antyufeeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 687, iss. 5. – 055025.*
2. *The 17 Goals // United Nations. – URL: https://sdgs.un.org/goals (date of access: 29.05.2025).*
3. *Юницкий, А.Э. Программа «ЭкоМир» / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 24–77.*
4. *Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А.Э. Юницкий. – Силакрогс: ПНБ принт, 2019. – 576 с.*
5. *Юницкий, А.Э. Экваториальный линейный город как альтернатива концепции «умных городов» / А.Э. Юницкий, С.С. Семёнов // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар.*

науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии», под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 223–228.

6. *Юницкий, А.Э. Структура социального пространства жилой среды нового типа: предпосылки, развитие, стратификация / А.Э. Юницкий, М.М. Давыдик // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 428–437.*
7. *Мазаев, Г.В. Компактный город – линейный город: единство противоположностей / Г.В. Мазаев // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2023. – № 3. – С. 9–13.*
8. *Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы V междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 23–24 сент. 2022 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск: СтройМедиаПроект, 2023. – 320 с.*
9. *Ritchie, H. Greenhouse Gas Emissions / H. Ritchie, P. Rosado, M. Roser // Our World in Data. – URL: https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions (date of access: 30.05.2025).*
10. *Road Traffic Injuries // World Health Organization. – URL: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries. – Publ. date: 13.12.2023.*
11. *Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы III междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 12 сент. 2020 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск: СтройМедиаПроект, 2021. – 516 с.*



УДК 656.02+629.7

Африканский транспортно-инфраструктурный коридор – предтеча экваториального линейного города

О.М. Зарецкий

uScovery DMCC,
г. Дубай,
Объединённые
Арабские Эмираты

Рассмотрена и обоснована идея строительства транспортной магистрали, с помощью которой не имеющие выхода к морским портам участники Конфедерации Альянса государств Сахеля (Мали, Буркина-Фасо, Нигер) смогут в полной мере использовать свои природные богатства для ускоренного экономического и социального развития. В дальнейшем эта транспортная линия может стать трансконтинентальной, соединив атлантическое побережье западной Африки с Красным морем.

Новизна предложения – в создании комплексного транспортно-инфраструктурного коридора, состоящего из цепочки логистически связанных кластеров опережающего экономического и социально-культурного развития. Данное решение основано на внедрении транспортных и биосферных технологий uST (линейные города, инновационное сельское хозяйство и агробиотехнологии, реликтовая солнечная биоэнергетика). Вовлечение местного населения в экономику и социальное развитие транспортного коридора обеспечит защиту материальных ресурсов от массового разграбления и вандализма.

Важность представленной концепции заключается в её универсальности: наработки по построению подобного трансграничного транспортно-инфраструктурного коридора могут быть применены в других регионах Африки, Азии и Латинской Америки при создании трансконтинентальных, трансрегиональных и трансостровных транспортных направлений или при планировании логистических дублёров стратегических морских каналов (например, Панамского или Суэцкого) и проливов (например, Ормузского или Баб-эль-Мандебского). Рассматриваемый трансафриканский коридор опережающего развития будет расположен на 600 км севернее экваториального линейного города и транспортной эстакады, возводимых в рамках программы «ЭкоМир», и фактически станет их предтечей.

Ключевые слова:
биосферные технологии, линейный город, общепланетарное транспортное средство (ОТС), транспортно-инфраструктурный коридор опережающего развития.

UDC 656.02+629.7

African Transport and Infrastructure Corridor as Precursor to Equatorial Linear City

O. Zaretskiy

uScovery DMCC,
Dubai, United Arab Emirates

This paper examines and substantiates the concept of constructing a transport corridor that would enable landlocked members of the Confederation of the Alliance of Sahel States (Mali, Burkina Faso, and Niger) to fully utilize their natural resources in order to accelerate economic and social development. In the future, this transport line may become transcontinental, linking the Atlantic Coast of West Africa with the Red Sea.

The novelty of the proposal lies in the creation of an integrated transport and infrastructure corridor consisting of a chain of logistically interconnected clusters of advanced economic and sociocultural development. This solution is based on the implementation of uST transport and biospheric technologies, including linear cities, innovative agriculture, agricultural biotechnologies, and relict solar bioenergy. The involvement of the local population in the economic and social development of the transport corridor will ensure the protection of its physical infrastructure from large-scale looting and vandalism.

The importance of the proposed concept lies in its universality: the experience gained in developing such a cross-border transport and infrastructure corridor can be applied in other regions of Africa, Asia, and Latin America when creating transcontinental, transregional, and trans-island transport routes, or when planning logistical alternatives to strategic maritime canals (such as the Panama or Suez Canals) and straits (such as the Strait of Hormuz or Bab-el-Mandeb). The trans-African advanced development corridor under consideration will be located 600 km north of the Equatorial Linear City and transport overpass being constructed under the EcoSpace program and will, in effect, serve as their precursor.

Keywords:
advanced development transport and infrastructure corridor, biospheric technologies, General Planetary Vehicle (GPV), linear city.

Введение

Создание общепланетарного транспортного средства (ОТС) является проектом, невиданным в человеческой истории по масштабам и сложности. В связи с этим важно получить практический опыт проектирования и возведения транспортно-инфраструктурного объекта, пусть и не идентичного, но в значительной мере схожего с ОТС и его элементами – экваториальным линейным городом, рельсо-струнной эстакадой, органами управления.

В статье рассматривается проект строительства трансграничного африканского транспортно-инфраструктурного коридора опережающего развития (ТАТИКОР), в том числе с точки зрения получения практического опыта возведения эстакады и экваториального линейного города на сухопутном участке ОТС. В настоящее время данная концепция разрабатывается группой компаний Юницкого по запросу правительства одной из стран, входящих в Конфедерацию Альянса государств Сахеля (АГС).

ТАТИКОР, имеющий на начальном этапе общую протяжённость 2150 км и способный превратиться в трансконтинентальную логистическую магистраль (протяжённость более 6000 км), которая свяжет Красное море с африканским побережьем Атлантического океана, может послужить не только определяющим фактором экономического развития региона, но и ключевым элементом преодоления множества социальных и экологических вызовов, стоящих перед африканскими странами.

Предполагается, что ТАТИКОР будет проходить в общем широтном направлении, в 600 км севернее экватора, и включать в себя как транспортные путевые эстакады, так и оборудованные для жизни и работы инновационные населённые пункты (линейные города), промышленные и сельскохозяйственные предприятия, комплексные зоны экономического роста и культурного развития, системы коммуникации, энергетики и водоснабжения. Всё это позволит рассмотреть вопросы технического, экономического и социального характера объекта, находящегося в подобных с ОТС условиях.

Кроме описания проекта ТАТИКОР, обоснования его необходимости и значимости задачей настоящей статьи является анализ возможностей и вызовов, связанных с будущим строительством ОТС.

Актуальность проекта строительства транспортной магистрали в Центральной Африке

Вся история эволюции человечества так или иначе связана с торговыми путями. Контроль над удобными маршрутами движения товаров в древности означал процветание и силу государства. С развитием цивилизации, ростом товарооборота и мобильности населения роль стратегических логистических проектов только увеличивалась.

В современном мире организация масштабных транспортно-инфраструктурных объектов, как правило, диктуется необходимостью ускоренного и безопасного перемещения людей и грузов, оптимизации расходов на логистику и обеспечения растущего товарооборота между странами и регионами.

Проблема транспортной связанности особенно остро стоит на Африканском континенте. Например, на него приходится 2 % общей протяжённости железных дорог и 3 % автомобильных дорог всего мира [1]. Даже страны, имеющие выход к морю и современную портовую инфраструктуру, не могут способствовать развитию своих отдалённых районов из-за отсутствия или плохого функционирования дорог и транспорта. Для государств, отделённых от моря существующими политическими границами, логистическая связанность, возможность полноценного участия в мировом товарообороте, быстрое и экономичное перемещение пассажиров, экспортируемых и импортируемых товаров становятся вопросами выживания и подлинной независимости.

Страны африканского саванного региона Сахель (Чад, Буркина-Фасо, Нигер, Мали и др.), обладая разнообразными природными ресурсами (золото, алмазы, уран, литий, медь, марганец и др.), сталкиваются с серьёзными вызовами из-за отсутствия транспортных связей с логистическими центрами, прежде всего с морскими портами [2], и поэтому не могут использовать свой потенциал для развития, оставаясь заложниками несправедливой системы экономических отношений.

В сложившихся условиях создание трансграничного логистического коридора, предоставляющего не имеющим выхода к морю странам АГС (Мали, Нигер, Буркина-Фасо) доступ к морским портам, является важнейшей задачей на пути к развитию и процветанию этих территорий. В будущем такой коридор может соединить Красное море и атлантическое побережье Африки, включив в единую транспортную систему участников АГС и прилегающие страны (Сенегал, Чад, Судан, Центральноафриканская Республика, Эритрея). Ответвления главной магистрали обеспечат доступ к различным месторождениям полезных ископаемых, сельскохозяйственным районам, городам и посёлкам, зонам перспективного экономического роста. Предлагаемые маршруты прохождения транспортных коридоров в регионе Сахель приведены на рисунке 1.

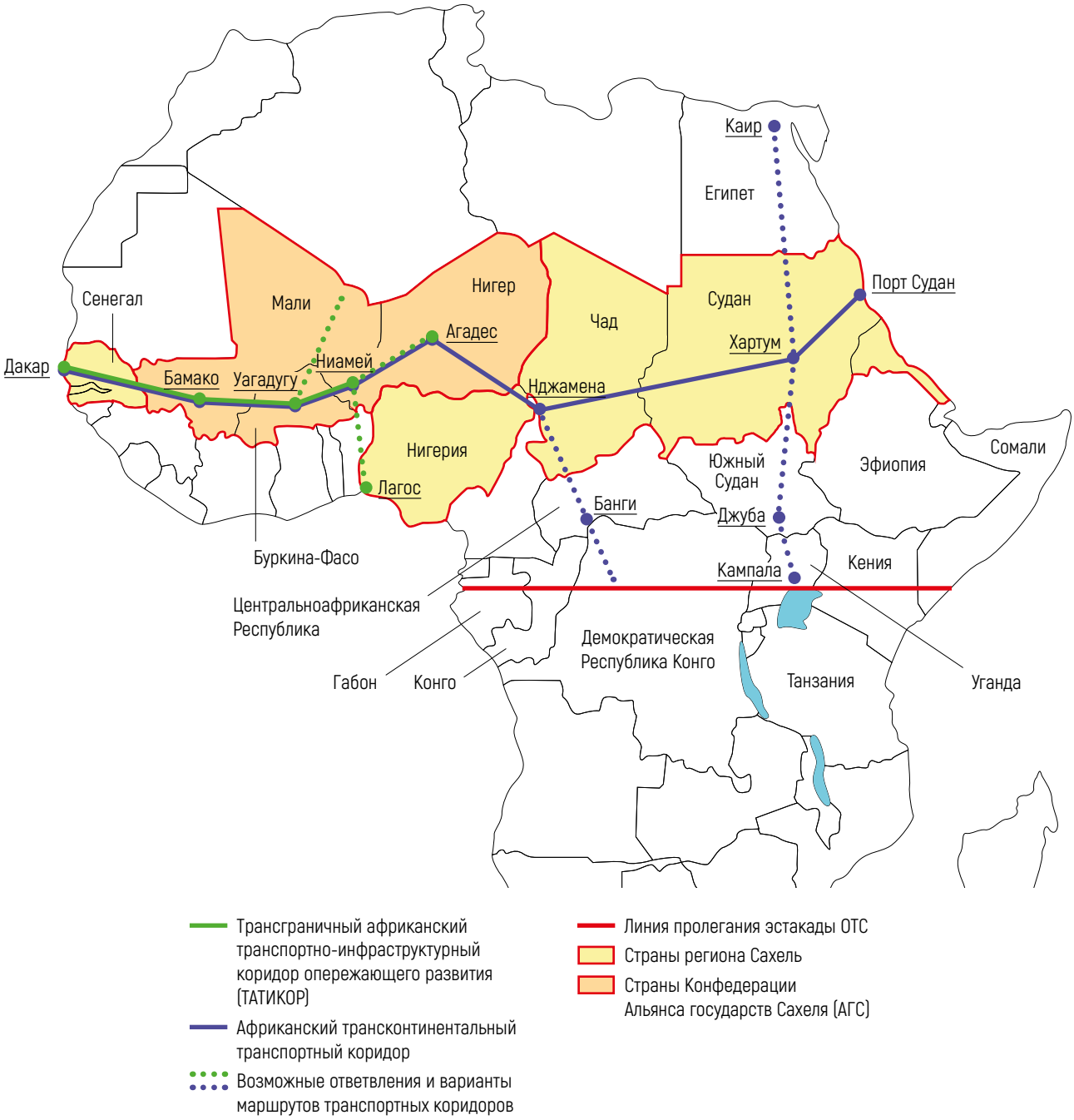


Рисунок 1 – Предлагаемые маршруты прохождения транспортных коридоров в регионе Сахель

В дальнейшем открывается возможность создания логистического коридора от побережья Атлантического океана до Красного моря, что позволит доставлять товары и грузы из Восточной Африки и Ближнего Востока на западное побережье континента без обхода через район мыса Доброй Надежды, известный своими сложными погодными условиями.

Таким образом, проект ТАТИКОР будет представлять собой не просто транспортную артерию, но и мощный драйвер комплексного развития всего региона, способный изменить социальную, экономическую и политическую ситуацию в Сахеле и за его пределами, став символом нового этапа в истории Африки.

Основные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации трансграничных транспортно-инфраструктурных объектов в Африке

Опыт создания транспортных путей на Африканском континенте доказывает, что игнорирование местных реалий, как правило, приводит к полной или частичной остановке инфраструктурных проектов. Особенно ярко это видно на примере африканских железнодорожных сетей. На грани закрытия находятся узкоколейная железная дорога Дакар (Сенегал) – Бамако (Мали) протяжённостью около 1286 км [3], а также железная дорога Аддис-Абеба – Джибути длиной примерно 800 км, соединяющая столицу Эфиопии с портом на побережье Красного моря [4].

Таким образом, несмотря на очевидную потребность в эффективной логистике и наличие множества амбициозных планов, на континенте до сих пор нет ни одного успешно функционирующего железнодорожного направления протяжённостью более 1000 км. Причины данного положения вещей кроются в специфике региона. Все попытки сооружения и эксплуатации железных дорог сталкиваются, во-первых, с чрезвычайно высокой стоимостью строительства, а во-вторых – с необходимостью защиты транспортной инфраструктуры от разграбления и вандализма. Африканские территории слабо развиты и мало заселены, поэтому создание и содержание эффективной системы охраны и обороны делают использование железнодорожных путей коммерчески невыгодным.

Можно предположить, что Струнный транспорт Юницкого (uST) представляет решение для организации эффективных транспортно-логистических систем в Африке, открывает уникальные возможности для реализации масштабных проектов, включая трансграничные и трансконтинентальные коридоры.

Одним из главных факторов успеха любого логистического проекта является экономическая обоснованность капитальных затрат. В условиях Африканского континента, где многие страны относятся к числу самых бедных в мире, этот аспект особенно важен. Высокая капитальная стоимость проектов здесь связана в первую очередь с дороговизной строительных материалов, дефицитом квалифицированной рабочей силы, сложностями с приобретением земельных участков у собственников, сообществ, племён, а также с существенными расходами на обеспечение безопасности объектов [5].

Технология uST предлагает решение сопоставимых транспортных задач при значительно более низких по сравнению с железными и автомобильными дорогами капитальных затратах и эксплуатационных издержках. Минимальная материалоёмкость элементов рельсо-струнной эстакады и объектов инфраструктуры [6], инновационные методы проектирования обуславливают простоту и быстроту возведения магистрали, что влечёт снижение капитальных затрат и накладных расходов на строительство, а также играет важную роль в увеличении коммерческой привлекательности проекта ТАТИКОР и возрастании заинтересованности частных инвесторов и иностранных партнёров.

Принципиально нового подхода требует и урегулирование вопроса безопасности транспортной инфраструктуры. Сооружение на Африканском континенте железнодорожных линий или других коммуникаций, направленных только на перевозку грузов и пассажиров, не может быть эффективным решением. Население региона воспринимает транспортные проекты как очередную попытку эксплуатации территорий без какой-либо пользы для коренных жителей. Все имеющиеся транспортные коммуникации, финансируемые преимущественно частными компаниями, сосредоточены исключительно на доставке ценных грузов из одного пункта в другой, игнорируя потребности местных сообществ, что вызывает серьёзное противоречие между интересами бизнеса и населения, живущего вдоль путей следования. В условиях повальной нищеты, беззакония и даже голода такое восприятие логистического проекта приводит к активному противостоянию, случаям грабежа и актам вандализма [7].

Единственным решением в сложившейся ситуации видится создание не просто транспортной линии, а целостной зоны комплексного инновационного развития. Данный подход должен основываться на применении передовых технологий не только в транспорте, но и в ключевых сферах жизни: сельском хозяйстве, строительстве, энергетике, системах орошения и мелиорации земель. Все эти направления предполагают тесную связь с масштабными инвестиционными программами, ориентированными на реальное улучшение уровня жизни населения в полосе прохождения транспортных путей.

Проект ТАТИКОР будет включать развитие новых экономических зон и аграрных районов, обеспечение местных жителей работой, современным жильём, необходимыми социально-культурными объектами. Такой комплексный подход должен вызвать заинтересованность коренного населения в функционировании транспортного коридора, превратив его из простой коммуникационной линии в мощный драйвер регионального развития. Это заложит прочную социальную базу для успешной реализации

проекта в целом, обусловит его долгосрочную устойчивость и экономическую эффективность.

Комплекс биосферных технологий, разработанных группой компаний Юницкого, представляет собой уникальное решение, способное преобразить не только транспортную инфраструктуру, но и весь социально-экономический ландшафт африканских государств.

Рельсо-струнную эстакаду благодаря её нахождению на втором уровне можно использовать не только как транспортную путевую структуру, не создающую помех местным земледельцам и скотоводам (в отличие от традиционной железной дороги), но и как основу для магистральных линий электропередач или водоснабжения. Это особенно важно для Сахеля, где дефицит электроэнергии и воды является серьёзной проблемой [8]. Таким образом, населённые пункты и сельскохозяйственные угодья вдоль маршрута получат надёжный доступ к данным жизненно необходимым ресурсам.

Сооружение модульных производственных и энергетических комплексов будет способствовать повышению урожайности сельскохозяйственных культур, локальной переработке продукции [9]. Наличие логистических путей обеспечит эффективный внутренний и внешний товарооборот и мобильность населения как в границах транспортного коридора, так и вне его, усилит экспортный потенциал производимой и добываемой продукции во всех странах Сахеля, сделает доступными цены на импортируемые товары и услуги. Всё это обусловит быстрое развитие районов, прилегающих к транспортному коридору, повысит их инвестиционную привлекательность и тем самым будет содействовать созданию региональной зоны опережающего развития, уникальной по своему характеру и имеющей все шансы стать ориентиром для становления других африканских регионов и стран.

Общее описание проекта ТАТИКОР

Проектирование, строительство и эксплуатация ТАТИКОР должно осуществляться с учётом природно-климатических и политико-социальных особенностей региона.

Сахель – это в основном равнинная территория с тропическим жарким климатом. Недостаток воды в данном районе вызван малым количеством источников и сезонным пересыханием рек и озёр [10]. В целом географические и природно-климатические условия региона благоприятствуют строительству магистралей на базе технологии струнного транспорта, который, будучи расположенным на втором уровне, менее подвержен воздействию песчаных бурь и заносов по сравнению с традиционными автомобильными и железными дорогами.

Главным водным препятствием на маршруте транспортного коридора является р. Нигер, проходящая через столицу Нигера – г. Ниамей (ниже по течению) и столицу Мали – г. Бамако (выше по течению). Ширина реки в городской зоне Ниамея составляет около 400 м, а в районе Бамако варьируется от 200 до 600 м. В возможных точках прохождения маршрута Нигер характеризуется небольшой глубиной (3–5 м) и слабым течением.

Транспортная эстакада пересечёт также р. Бафинг, Бауле и их притоки. Наличие множества мелких, в основном сезонно пересыхающих рек и ручьёв в бассейнах р. Нигер, Сенегал, Бакоя и Бауле не представляет серьёзной преграды для струнного транспорта, поскольку они имеют, как правило, неширокие русла и пологие берега.

Трудности могут быть обусловлены политико-социальными факторами, ведь Сахель перманентно сталкивается с нерешёнными общественными проблемами, что влечёт значительные риски для строительства и эксплуатации транспортной инфраструктуры [11]. Общая ситуация усугубляется глубоким кризисом, связанным с наличием сотен тысяч неустроенных беженцев из конфликтных зон [12].

Проектом предусматривается создание комбинированной транспортной магистрали с пассажирской и грузовой линиями и сопутствующими элементами транспортной инфраструктуры: станциями, депо, погрузочно-разгрузочными терминалами, пунктами управления и системами энергообеспечения и связи общей протяжённостью 2150 км. Потенциальный маршрут, отображённый на рисунке 2, будет проходить по территории АГС и Сенегала, соединив ключевые географические точки и инфраструктурные объекты на континенте с портом Дакар на атлантическом побережье.

В рамках маршрута ТАТИКОР предполагается организация ответвлений для связи транзитной магистрали с промышленными объектами, местами освоения полезных ископаемых, стратегически важными объектами государственного значения, находящимися на удалении от основной трассы.

Перспективным направлением развития проекта является масштабирование магистрали через территории Нигера, Чада и Судана, что позволит увеличить длину транспортного коридора на 4100 км и сформировать скоростную трансконтинентальную грузопассажирскую магистраль общей протяжённостью около 6250 км, проходящую от побережья Атлантического океана в Сенегале через Мали, Буркина-Фасо, Нигер, Нигерию, Чад и Судан до Красного моря (рисунок 1).

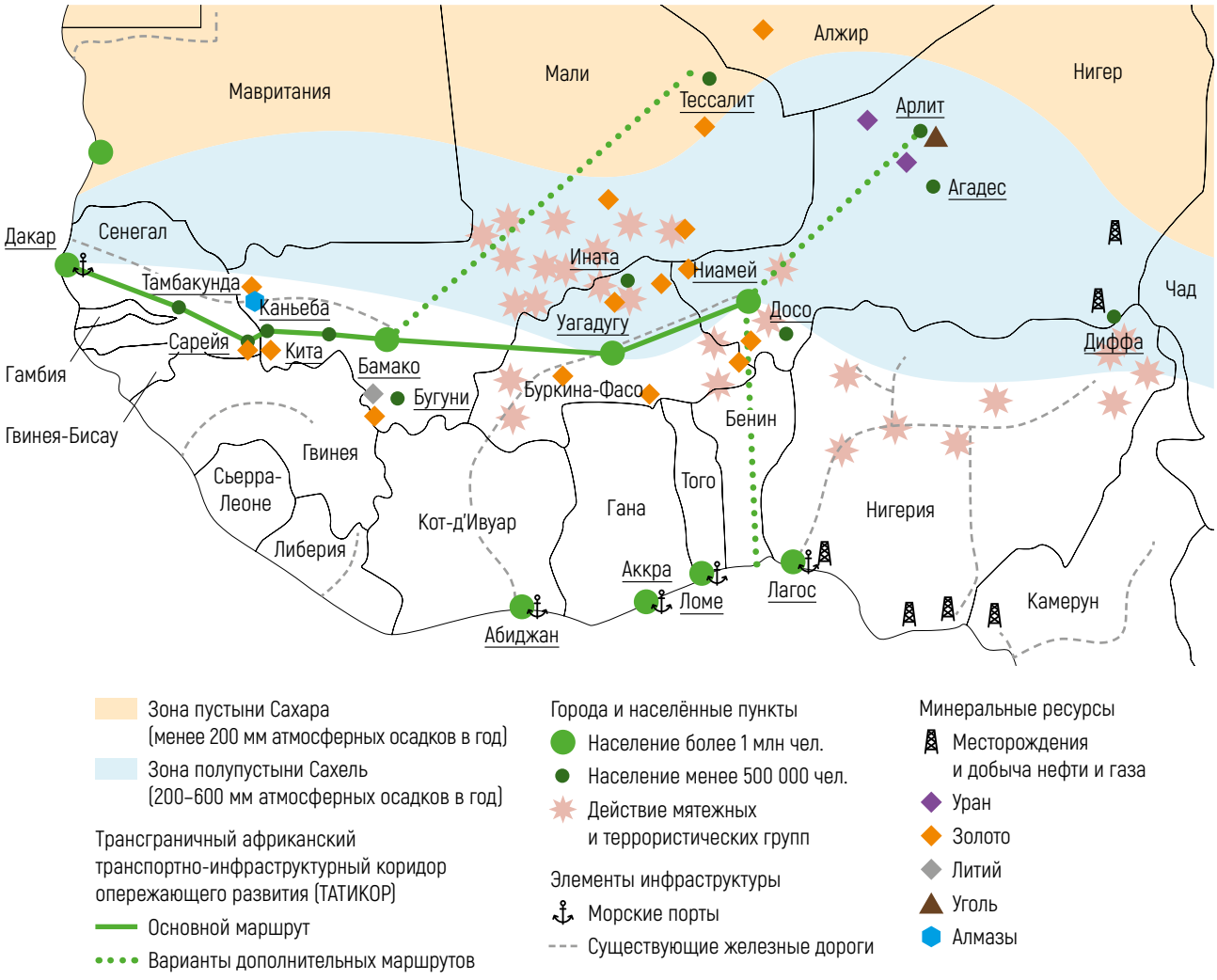


Рисунок 2 – Возможное расположение маршрута ТАТИКОР

Предлагаемые технологические решения

Основой ТАТИКОР станет рельсо-струнная комбинированная грузопассажирская скоростная магистраль, способная перевозить в перспективе до 50 000 тонн грузов различного назначения и до 100 000 пассажиров в сутки в одном направлении.

Грузовые транспортные линии ТАТИКОР планируется создать как связующее звено между логистическими узлами в местах разработки полезных ископаемых, морских портах, на индустриальных объектах. В их состав войдут комплексы «Юниконт» для перевозки стандартных морских контейнеров и «Юнитранс» для перемещения навалочных (насыпных) грузов (рисунок 3).

При необходимости на базе рельсо-струнной эстакады uST может быть организована система транспортировки углеводородов – магистральные газо- и нефтепроводы, что упростит и удешевит дополнительную перевозку больших объёмов нефти и природного газа, а также продуктов их переработки [13]. Кроме того, ТАТИКОР обеспечит движение скоростного пассажирского транспорта – беспилотных рельсовых электромобилей разной вместимости (рисунок 4).

uST предоставит возможность быстрого и комфортного передвижения пассажиров между городами и регионами. При этом адаптивность транспортных решений позволит регулировать общую производительность комплекса, учитывая текущие запросы, посредством организации перемещения пассажирского подвижного состава в электронной сцепке.

а)

б)

Рисунок 3 – Грузовые комплексы uST (визуализации):
а – «Юниконт»; б – «Юнитранс»

а)

б)

Рисунок 4 – Пассажирские транспортные средства uST (визуализации):
а – юнибус U4-212; б – юнибус U4-210

Таким образом, проект ТАТИКОР отвечает современным требованиям к транспортной инфраструктуре. Благодаря высокой производительности магистрали будет в полной мере реализован транзитный потенциал коридора: обеспечены надёжная связь между крупными экономическими центрами, эффективное перемещение пассажиров, а также экспортируемых и импортируемых ресурсов и товаров.

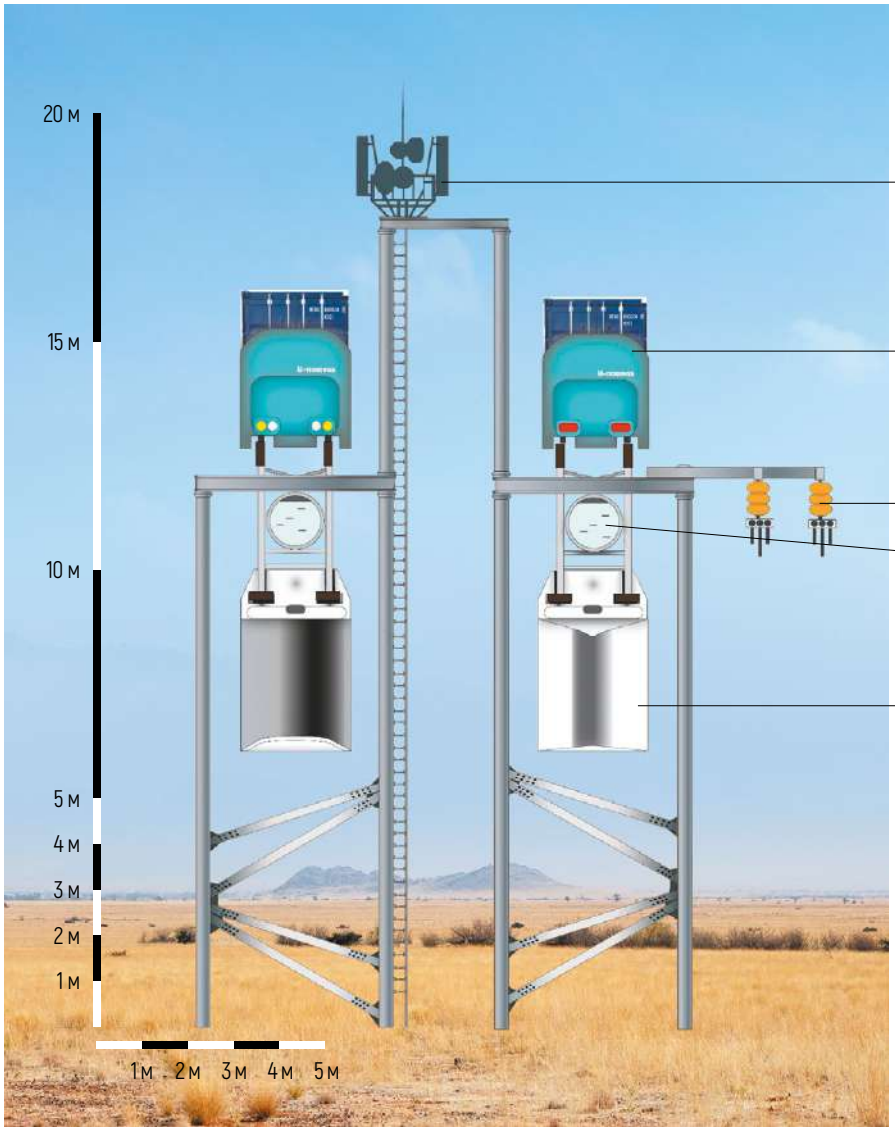
Освоение районов, прилегающих к магистральной оси, предлагается проводить с помощью инноваций, и в первую очередь биосферных инженерных технологий А.Э. Юницкого, включающих строительство экологичного жилья, реликтовую солнечную биоэнергетику, агробиотехнологии. Каждое из представленных решений научно аргументировано и реализовано в исследовательских центрах (в Республике Беларусь и Объединённых Арабских Эмиратах), входящих в международную группу компаний Юницкого [14].

Основу экономики территорий вдоль ТАТИКОР, кроме транспортной отрасли, будет составлять сельское хозяйство, традиционное для данного региона. При этом речь идёт о биосферном сельском хозяйстве, производстве биогумуса с помощью реликтовой солнечной биоэнергетики [15] и его применении для оживления пустынных почв. Производственная и транспортная инфраструктура сосредоточится в специальных экологичных поселениях нового типа – линейных городах, которые будут связаны между собой транспортной магистралью ТАТИКОР и объединены в производственно-жилую агломерацию, наподобие экваториального линейного города, построенного вдоль взлётно-посадочной эстакады ОТС [15]. В обоих случаях основой линейных поселений станет цепь из жилых кластеров, расположенных в полосе прохождения транспортной магистрали и размещённых между промышленными зонами и сельскохозяйственными угодьями.

Путевая эстакада uST, проходящая над поверхностью земли, может использоваться для создания коммуникаций электро- и водоснабжения. Наличие электричества и водных ресурсов обеспечит нормальное развитие городов и функционирование сельскохозяйственных и промышленных предприятий. Это особенно актуально, ведь нехватка пресной воды – одна из серьёзных проблем региона Сахель, которая усугубляется изменением климата на нашей планете. Засухи и недостаток воды ведут не только к низким урожаям, антисанитарии и болезням, но и к межплеменным конфликтам за источники воды, а также к терроризму [16].

Проект ТАТИКОР даёт возможность проложить поднятый над поверхностью земли водовод от океанского побережья вглубь континента, представляющий собой два магистральных комбинированных трубопровода диаметром около 1 м каждый для перемещения воды в объёме до 400 000 м^3 в сутки (рисунок 5).

Инновационные технологии опреснения воды с помощью солнечной энергии и оптимизированного процесса испарения и конденсации позволяют доставить морскую воду к месту потребления и проводить там опреснение практически без затрат на дополнительную электроэнергию (рисунок 6) [17].



Использование промежуточных опор для установки телекоммуникационного оборудования и элементов системы управления комплексом

Грузовая линия uST на базе комплекса «Юниконт», способная осуществлять перевозку до 100 000 тонн грузов в сутки

Размещение на опорах комплекса линий электропередач, коммуникационных (оптоволоконных) сетей

Закрытый напорный транзитный водовод для транспортирования морской воды от пункта забора до локальных опреснителей

Пассажирская линия uST на базе транспортного средства юнибус U4-210, способная осуществлять перевозку до 60 000 пассажиров в сутки

Рисунок 5 – Вариант исполнения рельсо-струнной эстакады грузопассажирской транспортной магистрали ТАТИКОР

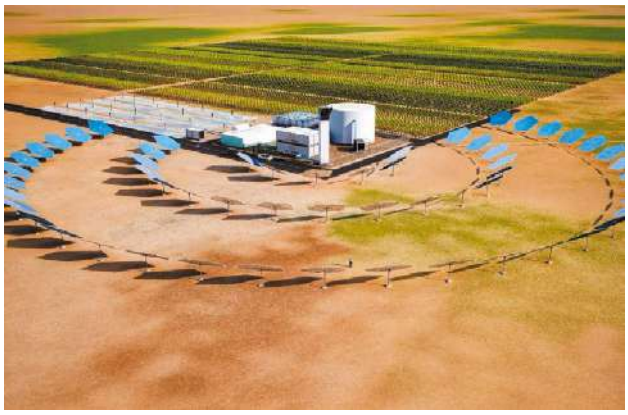


Рисунок 6 – Опреснительная установка компании DesertGreener (Германия), работающая исключительно на солнечной энергии (производительность до 400 м^3 воды в день) (визуализация)

Таким образом можно избежать потерь ценной опреснённой воды на испарение и утечку в процессе транспортировки на большие расстояния.

Система электрического питания струнного транспорта способна не только служить для тяги транспортных средств, но и являться частью энергосистемы и электрической сети для передачи электроэнергии от объектов генерации к преобразовательным и распределительным узлам, а также для связи смежных энергосистем (рисунок 5).

Промежуточные и анкерные опоры путевой структуры могут использоваться для размещения коммуникационного оборудования, ретрансляторов, в качестве вышек мобильной связи (рисунок 5), обеспечивая связанность территорий Сахеля и гармоничное развитие районов прохождения ТАТИКОР и близлежащих областей.

Финансирование проекта, потенциальные партнёры и инвесторы

Реализация проекта ТАТИКОР на базе биосферных инженерных технологий Юницкого позволяет значительно оптимизировать капитальные затраты по сравнению с существующими железными и автомобильными дорогами без ущерба для эффективности и надёжности транспортного комплекса.

Говоря об общих технико-экономических показателях струнного транспорта, необходимо отметить, что потребление электроэнергии, капитальные затраты на строительство и операционные расходы здесь существенно ниже, чем у главных конкурентов (в первую очередь у автомобильного и традиционного скоростного железнодорожного транспорта). Например, линия uST в два-три и более раз дешевле высокоскоростных железных дорог [18]. Это способствует участию инвесторов и заинтересованных партнёров в финансировании проекта. ТАТИКОР может привлечь немалые средства благодаря своей очевидной коммерческой и технической обоснованности.

В условиях обострившейся геополитической конкуренции между мировыми державами (США, Китай, Россия, страны Европейского союза и др.) всё более актуальными видятся вопросы установления тесного сотрудничества с африканскими государствами. Осознавая стратегическое значение Африки как источника ресурсов, растущего рынка и места для вкладов в инфраструктурные проекты, ведущие государства ищут возможности для укрепления своих позиций на континенте.

Россия, ближайший союзник стран – участниц АГС, должна сыграть важную роль в строительстве трансграничного транспортно-инфраструктурного коридора. Благодаря уникальным географическим характеристикам и богатому историческому опыту она является признанным лидером в организации масштабных транспортных проектов, обеспечивающих экономическое и социальное развитие удалённых регионов и вместе с тем связанность огромной территории. От Транссибирской магистрали, ставшей символом освоения Сибири, до современного Северного морского пути, открывающего новые горизонты для Арктики, – каждый проект несёт особую миссию созидания. Китайско-Восточная железная дорога и Байкало-Амурская магистраль доказали реальность освоения даже самых неблагоприятных районов, а Крымский мост стал одним из символов возможностей инженерии XXI в. [19].

Уникальный опыт строительства транспортных систем мирового масштаба позволяет России считаться лидером в реализации глобальных проектов, таких как ТАТИКОР.

Во-первых, эта страна может предложить передовые технологические решения, способные в сочетании с проектом транспортного коридора дать толчок прорывному развитию всей территории южнее Сахары. Ярким примером потенциала России является инновационный продукт от госкорпорации «Росатом» – плавучая атомная электростанция «Академик Ломоносов» (ПАТЭС) мощностью 70 МВт. До 2039 г. планируется построить ещё 18 плавучих атомных станций [20]. Размещение ПАТЭС в районе побережья Сенегала и коммуникационные возможности путевой структуры струнного транспорта позволят обеспечить электричеством

весь транспортный коридор, включая тяговые подстанции, элементы промышленной и гражданской инфраструктуры.

Во-вторых, Россия, активно укрепляя свои позиции в Африке и предоставляя поддержку африканским странам, заинтересована в повышении уровня всестороннего взаимовыгодного сотрудничества. Оно охватывает как совместную разработку богатейших месторождений полезных ископаемых, так и развитие торговых отношений, поставку современных технологий и высокотехнологичной продукции. Население только трёх стран АГС – Мали, Нигера и Буркина-Фасо – составляет более 70 млн человек, следовательно, эти территории могут стать значительным и перспективным рынком сбыта для российских товаров и услуг. Такая демографическая база создаёт возможности для расширения экономических связей и реализации крупных инвестиционных проектов, что образует прочную основу для интереса крупных российских государственных и частных компаний к участию в экономическом развитии региона. Инвестиции в проект ТАТИКОР окупятся благодаря уникальному сочетанию факторов, в числе которых добыча и переработка природных ресурсов, перспектива динамичного роста региональной экономики, возникновение новых производственных цепочек и формирование современной логистической инфраструктуры. Данные факторы обеспечивают долгосрочную привлекательность проекта как для российских инвесторов, так и для международных партнёров, заинтересованных в потенциале Африканского континента.

В-третьих, Россия уже заявила о наличии своих военных формирований и сил безопасности в регионе. Это поможет организовать защиту строительства транспортного коридора, что чрезвычайно важно в условиях периодической нестабильности территорий и наличия сторон, выступающих против независимого развития АГС.

Китайская Народная Республика также рассматривает Африканский континент как ключевой источник сырья для своей экономики. Данное обстоятельство открывает перспективы для участия в проекте ТАТИКОР китайских государственных и частных компаний в качестве потенциальных инвесторов и финансовых партнёров.

В любом случае сооружение такого крупного логистического коридора представляет собой уникальный шанс для всех заинтересованных субъектов. Возможность масштабирования и перенесения опыта создания транспортных магистралей на основе струнных и биосферных технологий Юницкого будет значимым стимулом для привлечения государственных и частных инвесторов. Это позволяет рассматривать проект ТАТИКОР как платформу для международного сотрудничества политико-экономических союзов, например БРИКС, где каждая сторона способна найти свою нишу и получить конкретные преимущества от участия в развитии региона.

Заключение

Решение задач транспортировки грузов, мобильности населения и строительства стратегических логистических путей становится приоритетным направлением для африканских стран, в первую очередь не имеющих выхода к морю.

Создание АГС предоставляет реальную возможность приступить к возведению трансграничной грузопассажирской транспортной магистрали (общая протяжённость 1570 км), основной задачей которой на начальном этапе будет соединение морского порта Дакар (Сенегал) с г. Ниамеем (Нигер) через г. Бамако (Мали) и г. Уагадугу (Буркина-Фасо). В последующем планируется формирование трансконтинентальной линии Дакар (Сенегал) – Порт-Судан (Судан) или другой порт на Красном море.

Принимая во внимание сложность и масштабность строительства и эксплуатации транспортной артерии длиной тысячи километров на преимущественно малоосвоенной территории, можно с уверенностью сказать, что традиционные технологии и методика их применения абсолютно непригодны в рамках поставленной задачи.

Одним из способов глобального переустройства как транспортно-инфраструктурной системы, так и экономико-социальной модели развития Сахеля является проект ТАТИКОР, основанный на передовых инженерных разработках группы компаний Юницкого – грузопассажирских транспортно-инфраструктурных решениях в комбинации с инновационными биосферными технологиями в жилой и производственной инфраструктуре, энергетике и сельском хозяйстве. Кроме того, строительство и развитие маршрута ТАТИКОР станет бесценным опытом по возведению и эксплуатации эстакады ОТС и экваториального линейного города. Расположенная на 600 км южнее, эстакада ОТС будет также проходить по африканской территории, т. е. по местности, во многом схожей с регионом Сахель.

Список основных источников

1. *Agyei-Boakye, O.P. Here Is Why Africa's Transport System Is Undeveloped / O.P. Agyei-Boakye // Transport Africa. –*

URL: https://www.transportafrica.org/here-is-why-africas-transport-system-is-underdeveloped/. – Publ. date: 01.04.2022.

2. *Trade and Development Report, 2003: Capital Accumulation, Growth and Structural Change: Report by the Secretariat of the United Nations Conference on Trade and Development, Geneva, 2003. – New York [et al.]: United Nations, 2003. – 184 p. – URL: https://unctad.org/system/files/official-document/tdr2003_en.pdf (date of access: 24.04.2025).*
3. *Bullock, R. Off Track: Sub-Saharan African Railways / R. Bullock. – Washington: The World Bank, 2009. – 106 p. – URL: https://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/sites/default/files/2024-08/Africa_Offtrac%20-%20Sub Saharan%20African%20Railways_EN.pdf (date of access: 24.04.2025).*
4. *Anberbir, Y. Running Out of Steam / Y. Anberbir // The Reporter. – URL: https://www.thereporterethiopia.com/2711/. – Publ. date: 28.01.2017.*
5. *Vilardell, J.M. Reform Schemes for African Railway and Road Networks / J.M. Vilardell, M.E. Mateo // ALG. – URL: https://alg-global.com/blog/land/reform-schemes-african-railway-and-road-networks. – Publ. date: 02.10.2023.*
6. *Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А.Э. Юницкий. – Минск: Беларус. навука, 2017. – 342 с.: ил.*
7. *Cuenca, O. Ethiopia–Djibouti Line Reports Reduced Revenue due to Vandalism / O. Cuenca // International Railway Journal. – URL: https://www.railjournal.com/news/ethiopia-djibouti-line-reports-reduced-revenue-due-to-vandalism/. – Publ. date: 16.12.2020.*
8. *Комплексное управление водными ресурсами при помощи ядерных методов. Сахельский проект, реализуемый при поддержке МАГАТЭ в Африке: тематическое исследование // Обозрение МАГАТЭ. – 2017. – № 2. – URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/integrated-management-of-water-resources-using-nuclear-techniques_rus.pdf (дата обращения: 06.05.2025).*
9. *Юницкий, А.Э. Цивилизационная ёмкость космического дома по имени Планета Земля / Анатолий Юницкий. – Минск, 2021. – 148 с.*
10. *Радченко, Г.Ф. Страны Сахеля (состояние природной среды и проблемы развития сельского хозяйства) / Г.Ф. Радченко. – М.: Мысль, 1983. – 262 с.*
11. *Исаев, Л.М. Глобальная террористическая угроза в Сахеле и истоки терроризма в Буркина-Фасо / Л.М. Исаев, А.В. Коротаев, Д.А. Бобарыкина // Вестник РУДН. Серия: Международные отношения. – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 411–421.*
12. *Соломон, Х. Анализ причин конфликта в Сахеле / Х. Соломон // Болевые точки Африканского континента: Сахель (обзор ситуации и перспективы): докл. Рос. совета по междунар. делам и Междунар. ком. Крас. Креста № 77/2022 / А.В. Кортунов, И. Асланов, Х. Соломон [и др.]; под ред. Е.О. Карпинской, Т.С. Богдасаровой, И.А. Цымбал; Рос. совет по междунар. делам. – М., 2022. – С. 8–14.*
13. *Юницкий, А.Э. Транспортный комплекс SkyWay в вопросах и ответах: 100 вопросов – 100 ответов / А.Э. Юницкий // FlipHTML5. – URL: https://fliphtml5.com/rqkc/abxz. – Publ. date: 23.04.2017.*
14. *Юницкий, А.Э. Программа перезагрузки экономики Союзного государства России и Беларуси на биосферный путь цивилизационного развития / А.Э. Юницкий. – Минск, 2022. – 132 с.*
15. *Зарецкий, О.М. Обеспечение общественной безопасности при строительстве и эксплуатации общепланетарного транспортного средства / О.М. Зарецкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 426–439.*
16. *Во многих странах терроризм возникает из-за бедности и нехватки воды – эмиссар генсека ООН Леонардо Сантос Симао заявил о необходимости борьбы с бедностью // Repost. – URL: https://repost.uz/i-takie-prichini-est. – Дата публ.: 28.03.2024.*
17. *Chandler, D.L. Solar-Powered System Offers a Route to Inexpensive Desalination / D.L. Chandler // MIT. – URL: https://news.mit.edu/2022/solar-desalination-system-inexpensive-0214. – Publ. date: 14.02.2022.*
18. *Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А.Э. Юницкий. – Силакрогс: ПНБ принт, 2019. – 576 с.*
19. *Мосты над Керченским проливом. Как строили 70 лет назад и сегодня // РИА Новости. – URL: https://ria.ru/20250429/mosty-2014163914.html. – Дата публ.: 29.04.2025.*
20. *Лебедев, А. ПАТЭС на экспорт: зачем «Росатом» строит плавучие энергоблоки / А. Лебедев // Страна Росатом. – URL: https://strana-rosatom.ru/2024/12/01/pates-na-eksport-zachem-rosatom-stro/. – Дата публ.: 01.12.2024.*

УДК 37.014+629.7

Инженерная школа Юницкого как инструмент кадровой перезагрузки Союзного государства

А.Ю. Потеряйко

Научная школа
стратегического планирования
Н.И. Ведуты,
г. Москва, Россия

Выявлены основные причины кадрового кризиса в Союзном государстве России и Беларуси, определены угрозы деградации инженерного образования, описаны меры, осуществляемые научной школой А.Э. Юницкого и АНО «Родина будущего» при участии АНО «Научная школа стратегического планирования Н.И. Ведуты» с целью подготовки инженеров для биосферной цивилизации.

Новизна настоящего исследования заключается в создании программы обучения детей и подростков на базе междисциплинарного подхода и ценностно-смысловой педагогики по направлениям: энергетика будущего, авиастроение и проектирование летательных аппаратов, энергоэффективный и экологичный транспорт, биосферное сельское хозяйство, защита окружающей среды, проектирование и строительство линейных городов, кибернетическое планирование, философия освоения космического пространства, стратегическое управление, инженерия информационного пространства, нравственные и этические основы, коллективные коммуникации, здоровьесбережение.

Ожидаемые результаты от реализации программы – формирование человека будущего, инженера, творца, патриота; создание образовательной среды для воспитания и обучения духовно, психологически и физически здоровой личности, нравственно и интеллектуально развитой, способной к созиданию и защите справедливого общества; повышение роли и статуса инженерных специальностей.

Ключевые слова:
биосферная цивилизация, государственная политика в области образования, дефицит кадров, инженерные специальности, кибернетическое планирование, подготовка кадров, социокультурная среда.

UDC 37.014+629.7

Unitsky Engineering School as a Tool for Personnel Restructuring in the Union State

A. Poteryaiko

N.I. Veduta Strategic Planning Scientific School,
Moscow, Russia

The main causes of the personnel crisis in the Union State of Russia and Belarus, as well as the threats of degradation in engineering education, have been identified. The measures being implemented by A. Unitsky scientific school and the autonomous non-profit organization "Rodina Buduschego" (Motherland of the Future), with the participation of the autonomous nonprofit organization N.I. Veduta Strategic Planning Scientific School, aimed at training engineers for a biospheric civilization, have been described.

The novelty of this study lies in the creation of a program for teaching children and adolescents based on an interdisciplinary approach and value-based pedagogy in the following areas: energy of the future, aircraft construction and design, energy-efficient and environmentally friendly transport, biospheric agriculture, environmental protection, design and construction of linear cities, cybernetic planning, philosophy of space exploration, strategic management, information space engineering, moral and ethical foundations, collective communications, and health preservation.

The expected results of the program's implementation are the formation of the person of the future, an engineer, a creator, a patriot; the creation of an educational environment for the upbringing and training of a spiritually, psychologically, and physically healthy personality, morally and intellectually developed, capable of creating and defending a just society; and an increase in the role and status of the engineering profession.

Keywords:
biospheric civilization, cybernetic planning, engineering specialties, personnel shortage, personnel training, sociocultural environment, state policy in the field of education.

Введение

С 2023 г. на рынке труда России и Беларуси наблюдается резкая нехватка квалифицированных рабочих [1] и инженеров. При этом планируется сформировать единую промышленную политику и осуществлять подготовку инженерных кадров. По мнению экспертов, наиболее востребованы в обеих странах инженеры оборонно-промышленного комплекса (ОПК), именно туда направлены государственные инвестиции [2]. Помимо ОПК перспективными отраслями являются авиация и кораблестроение, а следовательно, там возникнет острая потребность в высококвалифицированных специалистах.

В России рынок инженерных кадров разбалансирован, показатели спроса на профессионалов зависят от региона и отрасли. По данным на 2025 г., общий дефицит инженерных работников составляет 9 % от их общей численности и оценивается в 280 000–300 000 человек [3]. В Беларуси на сегодняшний день вакантно не менее 5000 мест для инженеров [4].

Философские, мировоззренческие и социально-экономические причины кадрового кризиса в Союзном государстве

Основные причины кризиса в ключевых отраслях экономики Союзного государства России и Беларуси (СГРБ) разделяются на философско-психологические (пропаганда моды на потребление и образа жизни, в котором в первую очередь развиваются эгоизм и лень, происходит нивелирование личной ответственности и наблюдается процесс расчеловечивания через изменение природы человека, его обезличивание и превращение в придаток техносферы) и социально-экономические (разрыв межотраслевых связей между предприятиями и отраслями, отсутствие кадрового планирования, ухудшение условий труда, снижение заработной платы и др.) [5].

К данным причинам можно добавить мировоззренческие, т. е. несоответствие ценностей и установок сотрудников и работодателей [6]. Речь идёт не только о конфликте корпоративной этики с убеждениями, культурой и традициями работников, но и о несовпадении представлений человека о своём месте в жизни общества, смысле своего труда, значимости результатов для государства, направлениях личностного и профессионального развития с целями и задачами, которые ставит перед ним организация. Кроме того, наблюдаются расхождения между сотрудником и предприятием по основным человеческим ценностям: справедливости, приоритету духовного над материальным, коллективизму, взаимопомощи и взаимоуважению. Такие конфликты приводят к снижению мотивации выбирать те или иные профессии, связанные, например, с устойчивым и часто ложным убеждением в их невостребованности обществом и государством.

Наконец, ещё одним немаловажным фактором, влияющим на рост дефицита высококвалифицированных инженерных работников, является снижение качества школьного, среднего специального и высшего образования [7].

Названные причины кадрового кризиса могут привести и к другим необратимым для СГРБ последствиям (рисунок 1):

- кризису мировоззрения: размыванию социокультурной идентичности и замене отечественных ценностей чуждыми деструктивными ценностями и смыслами;
- демографической проблеме как индикатору морального и материального неблагополучия общества;
- экономическим кризисам, вызванным отставанием научно-технического прогресса от более развитых стран;
- разрушению экосистемы Земли человеком как следствию отсутствия достаточного объёма знаний и моральных принципов;
- кризису интеллекта человека как результату ложного целеполагания системы образования.

Рисунок 1 – Глобальные последствия кадрового кризиса для СГРБ

Цель работы – определить основные направления стратегии развития инженерного образования и государственной политики в области образования в СГРБ, показать

практические шаги, предпринимаемые ЗАО «Струнные технологии», ООО «Астроинженерные технологии» и АНО «Родина будущего» в сфере подготовки специалистов для биосферной цивилизации.

О необходимости пересмотра государственной политики в сфере образования и подготовки кадров

Новая государственная политика в сфере образования России и Беларуси способна выступить эффективным инструментом для решения сложившейся кадровой проблемы, особенно в области подготовки инженерных специалистов, поскольку современный цивилизационный мир, каким мы его знаем, стал возможен только благодаря инженерии [8]. Следовательно, нужно подойти к разработке общей доктрины и стратегии образования в СГРБ, основываясь на принципах социокультурного и кибернетического подхода. Эти документы должны описывать цели и задачи государственной политики в области образования [5].

Ключевые направления такой политики: формирование человека-творца, ставящего перед собой высокие цели и находящего пути их достижения, обладающего эмпатией, нравственными навыками саморегулирования и самоограничения, отношением к окружающему миру на основе человечности, способностью оперировать различными типами мышления – от образного до диалектического [9]; воспитание высоконравственной личности, уважающей традиционные ценности, владеющей актуальными знаниями и умениями, стремящейся реализовать свой потенциал в современном обществе, готовой к мирному созиданию и защите Отечества [10].

Предлагаемая политика предусматривает организацию социокультурной среды обитания человека, в которой люди воспитываются на протяжении всей жизни и консолидируются глубоко укоренёнными традиционными идеалами и глобальными целями: изучение Вселенной, освоение ближнего и дальнего космоса [11], развитие и использование новых биосферных технологий в условиях перехода к постканиталистической экономике [12]. Нельзя представить новую политику образования без применения социально-экономических инструментов, таких как кибернетическое планирование (динамическая модель межотраслевого-межсекторного баланса Н.И. Ведуты) [13], обеспечивающее балансовые расчёты потребностей хозяйствующих субъектов в специалистах и возможностей государства по подготовке данных кадров в текущий период, а также с горизонтом скользящего планирования 5–10–30 лет.

Инженерная школа Юницкого как образец подготовки специалистов для биосферной цивилизации

В эпоху угрозы замены человека компьютерными технологиями и регрессии его природы и духовно-нравственной составляющей [12] нужно вернуть людей в лоно человечности через процесс обучения и воспитания, который идёт по определённым ступеням ценностно-смыслового восхождения (рисунок 2).

Рисунок 2 – Ступени ценностно-смыслового восхождения в образовательном процессе

Практика показывает, что современная система образования в СГРБ не ставит в приоритет развитие личности в соответствии с идеалами универсальных ценностей, что является большим упущением в воспитании инженера мира и человека-творца. Однако в обществе назрела необходимость в изменении парадигмы образования и воспитания для формирования людей нового типа, и проект «Инженерная школа Юницкого» может не только удовлетворить эту потребность, но и изменить мир, направив его на путь исправления допущенных человечеством технологических,

экологических, экономических, культурных и нравственных ошибок (рисунок 3).

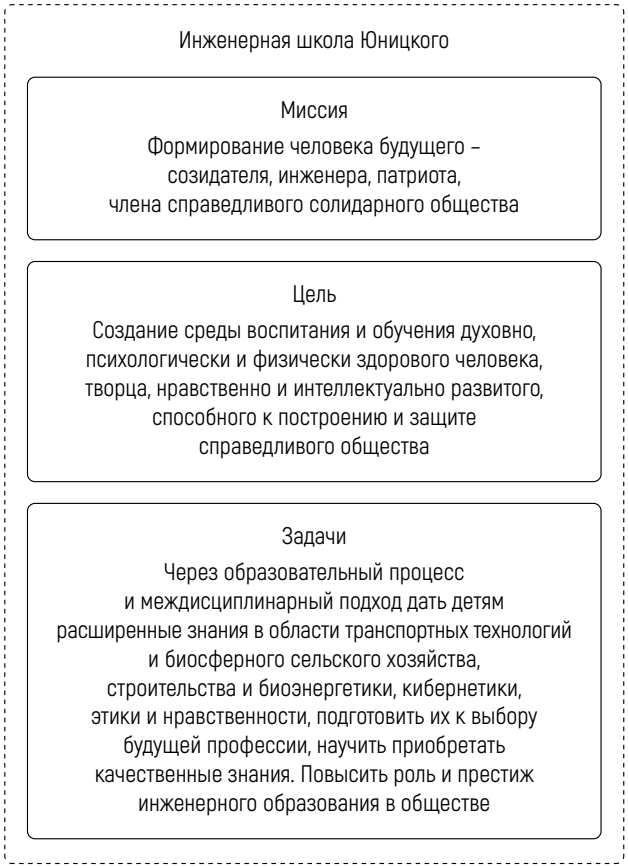


Рисунок 3 – Миссия, цели и задачи Инженерной школы Юницкого

Миссия проекта заключается в формировании человека будущего – созидателя, инженера, патриота, члена справедливого солидарного общества.

Цель проекта – создание среды воспитания и обучения духовно, психологически и физически здорового человека, творца, нравственно и интеллектуально развитого, способного к построению и защите справедливого общества.

Задача Инженерной школы Юницкого – через образовательный процесс и междисциплинарный подход дать детям расширенные знания в области транспортных технологий и биосферного сельского хозяйства, строительства и биоэнергетики, кибернетики, этики и нравственности, подготовить их к выбору будущей профессии, научить приобретать качественные знания, повысить роль и престиж инженерного образования в обществе.

Проект предлагает для подготовки инженеров будущего взять за основу следующие дисциплины: новая энергетика, авиастроение и проектирование летательных аппаратов, энергоэффективный и экологичный транспорт, биосферное сельское хозяйство, защита окружающей среды, проектирование и строительство пешеходных линейных городов кластерного типа, кибернетическое планирование. В современном образовательном процессе невозможно обойтись без междисциплинарного подхода. Здесь важно использовать ценностно-смысловой принцип обучения и воспитания с помощью таких программ, как философия освоения космического пространства, инженер нового поколения – стратег и управленец, инженерия информационного пространства, нравственные и этические основы управления, коллективные коммуникации, технология здоровьесбережения, социальная инженерия.

В проекте задействованы самые эффективные отечественные методики образования, применяемые на практике в последние 40 лет: ценностно-смысловая педагогика [14], практико-ориентированное обучение [15], проектно-ориентированный подход [16], здоровьесберегающие технологии [17], производственное наставничество [18], работа с родителями [19].

Инженерная школа Юницкого предполагает реализацию нескольких подпроектов, которые обеспечивают разный уровень подготовки детей и подростков по инженерным специальностям (рисунок 4).

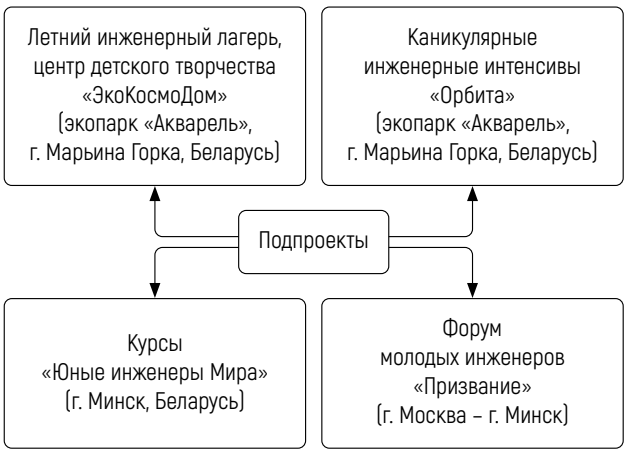


Рисунок 4 – Подпроекты Инженерной школы Юницкого

1. Летний инженерный лагерь, центр детского творчества «ЭкоКосмоДом» – это полноценный инженерный лагерь для детей от 10 до 15 лет. В отличие от интенсивов

занятия здесь нацелены на моделирование, сложное проектирование, применение полученных в школе знаний по физике и математике для создания инженерных проектов.

Большое значение придаётся физическому развитию детей, их взаимодействию с природой, трудовому воспитанию. Каждый участник становится не потребителем услуг, а тем, от кого зависит благополучие всего отряда. В ребятах воспитывается ответственность, гуманизм, коллективизм, патриотизм.

Проект имеет международный характер, поскольку гостеприимные двери экопарка «Акварель» открыты не только для юных белорусов, но и для ребят со всего постсоветского пространства и зарубежных стран.

2. Курсы «Юные инженеры Мира» – это дополнительное образование для тех, кто хочет связать свою жизнь с самыми важными профессиями будущего – инженерными. Занятия ориентированы на жителей г. Минска и Минской области, потому что проходят в течение рабочей недели, во второй половине дня. На курсах дети знакомятся с направлениями, которые развивает А.Э. Юницкий в своей научной школе: пробуют моделировать транспортные системы и города будущего, использовать биосферные сельскохозяйственные технологии на практике, осваивают историю и философию инженерной мысли, углубляются в великую идею космоса и космического будущего человечества, учатся работать в команде и грамотно соревноваться коллективами, открывают для себя красоту и рубежи теоретической и прикладной научной деятельности.

Должное внимание уделяется астрономии и устройству Вселенной [11], так как человек будущего – это человек, пребывающий в гармоничном единении со Вселенной, управляющий жизнью на Земле и за её пределами [20].

Курсы «Юные инженеры Мира» – своего рода подготовка к переходу от школьной скамьи к обучению профессии под строгим и чутким руководством педагогов-наставников.

3. Каникулярные инженерные интенсивы «Орбита» рассчитаны на детей и подростков от 8 до 14 лет и предлагают развлекательно-познавательную программу, направленную на развитие изобретательских способностей подрастающего поколения. Отличительной особенностью обучения является погружение детей в проектную деятельность, осмысление ими инженерной сути мира, своего места и роли в жизни общества, раскрытие их представлений о технологиях и профессиях будущего.

Задача интенсивов – подтолкнуть школьников к нравственному изобретательству, сделать первый шаг в выборе своей профессии как предназначения. Занятия проходят в игровой и проектной форме, особое внимание уделяется связи инженерных дисциплин, изобразительного искусства, ручного труда и литературного творчества.

4. Форум молодых инженеров «Призвание» станет ежегодным знаковым мероприятием в СГРБ для популяризации науки и инженерных специальностей. Это уникальная, новая демонстрационная модель образования и профессиональной ориентации будущего (таблица). Форум собирает лучшие методики, направленные на развитие личности, общества, возрождение института наставничества, а также на воссоздание промышленного и сельскохозяйственного производства. По задумке, площадка имеет международный статус, приветствующий участие стран БРИКС+. Резолюции форума «Призвание» должны лечь в основу законопроектов в сфере образования на территории СГРБ, а демонстрируемые практические решения планируется масштабировать на территории стран-участниц для формирования единого образовательного пространства.

Таблица – Краткое описание форума молодых инженеров «Призвание»

Организационные моменты	Основные мероприятия	Итоги
Периодичность: два раза в год. 1500+ участников. Официальная программа с участием органов власти (г. Москва). Культурно-образовательная программа (г. Минск). Целевая аудитория: старшеклассники, родители, образовательные учреждения, чиновники, промышленные предприятия	Торжественные церемонии открытия и закрытия. 40+ практикумов и мастер-классов от ведущих предприятий СГРБ. Круглые столы по вопросам подготовки кадров с участием представителей молодёжных парламентов. Лекции и практические занятия для педагогов и руководителей образовательных учреждений. Ярмарка профессий. Кинопоказ лучших детских художественных и документальных фильмов. Подведение итогов научных и литературных конкурсов	Профессиональная ориентация подростков. Кадровые решения для промышленных предприятий. Подписание знаковых соглашений между предприятиями, образовательными учреждениями и органами власти. Повышение престижа инженерных профессий

Перечисленные подпроекты являются только первыми шагами, направленными на создание Инженерной школы Юницкого как образца подготовки специалистов для биосферной цивилизации всего Мира.

Перспективы развития инженерных школ Союзного государства

Инженерная школа Юницкого не ограничивается текущими направлениями. Важно понимать, что предложенный образец образования и воспитания должен быть масштабирован хотя бы в пределах СГРБ и привести к возникновению сети инженерных школ в тесной взаимосвязи с промышленными предприятиями, общественными организациями, родительским сообществом.

В перспективе – создание не только международной сети Инженерной школы Юницкого, но и Международной инженерной академии А.Э. Юницкого, в которой будет проходить подготовка как инженеров, так и педагогов для биосферной цивилизации. Кроме того, в планах – запуск Международного научного центра инженерного творчества – постоянно действующей резиденции для увлечённых наукой и инженерией детей и подростков.

Хорошо зарекомендовала себя форма обучения школьников с круглогодичным пребыванием на территории образовательного заведения. В связи с этим ещё одно рассматриваемое направление развития Инженерной школы Юницкого – школа-пансион с углублённым изучением инженерных дисциплин.

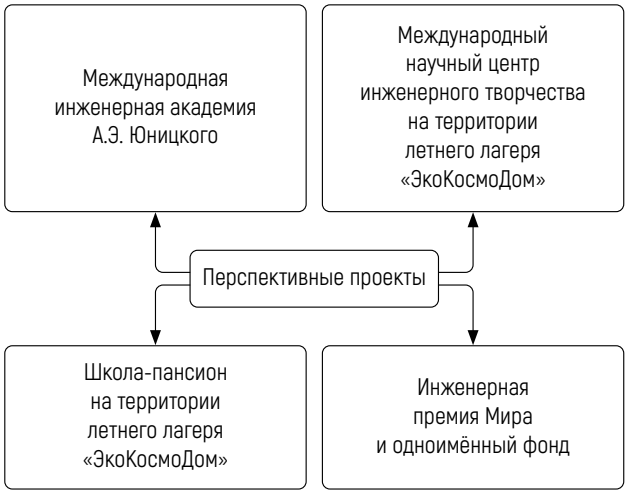


Рисунок 5 – Направления развития Инженерной школы Юницкого

И, наконец, проект-миссия Инженерной школы Юницкого – это Инженерная премия Мира, которая станет аналогом Нобелевской премии, но в области инженерии и изобретательства (рисунок 5).

Заключение

Сложно не согласиться со словами выдающегося учёного, инженера, визионера и гуманиста А.Э. Юницкого: «Инженерия – разновидность высшего творчества как деятельности человека по преобразованию окружающей его материальной действительности. Цели инженерии всегда чётко определены и направлены на достижение практически измеримого результата, а средства ограничены личным опытом, знаниями, требованием минимизации ресурсов и усилий при максимизации эффективности, а также закономерностями окружающего нас физического мира, заложенными Создателем изначально, в момент Творения Вселенной» [8]. Именно поэтому воплощение идей Инженерной школы Юницкого становится целью ежедневной работы тех, кто разделяет его мировоззрение, несёт ответственность не только за социально-экономическое развитие СГРБ и благополучие всех его граждан, но и заботится о планете Земля и людях, населяющих её.

Инженерная школа Юницкого призвана быть образцом, одним из инструментов для формирования и реализации политики СГРБ в сфере образования. Подготовка специалистов для биосферной цивилизации – это лишь первый шаг на пути к процветающему обществу. Второй фазой станет создание единой цивилизации землян, имеющей общую грандиозную миссию – исследование и освоение прекрасного и бесконечного космического пространства [21].

Список основных источников

1. *Васильева, Ю. На рынке труда Союзного государства резко вырос спрос на представителей рабочих специальностей / Ю. Васильева, А. Нестеров // Беларусь сегодня. – URL: https://www.sb.by/articles/i-rukastyy-i-golovastyy.html. – Дата публ.: 20.01.2023.*
2. *Узбекова, А. Россия и Беларусь усилят подготовку кадров инженерного профиля / А. Узбекова, В. Яковлев // Беларусь сегодня. – URL: https://www.sb.by/articles/mashinnoe-obuchenie.html. – Дата публ.: 27.09.2024.*
3. *Сколько в России инженеров: исследование рынка технических кадров // Skypro. – URL: https://sky.pro/*

wiki/profession/skolko-v-rossii-inzhenerov-issledovanie-rynka-tehnicheskih-kadrov/ (дата обращения: 11.05.2025).

4. *Лукьянюк, С. Реальному сектору не хватает инженерных кадров – какие шаги предпримут / С. Лукьянюк // News.by. – URL: https://news.by/news/obshchestvo/realnomu-sektoru-ne-khvataet-inzhenernykh-kadrov-kakie-shagi-predprimut. – Дата публ.: 17.12.2024.*
5. *Потеряйко, А.Ю. Подготовка кадров для биосферной цивилизации: социокультурный и кибернетический подход / А.Ю. Потеряйко, Е.В. Фоменко // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 466–477.*
6. *Таганова, Е.Н. Факторы кризиса персонала в управлении современной компанией / Е.Н. Таганова // Управление персоналом и интеллектуальными ресурсами в России. – 2024. – № 2 (71). – С. 54–58.*
7. *Сарьян, В.К. Негативные явления в образовании РФ – реальная угроза технологическому суверенитету страны / В.К. Сарьян, В.К. Левашов, О.В. Гребняк // Россия: тенденции и перспективы развития / РАН, Ин-т науч. информ. по обществ. наукам [и др.]; отв. ред. В.И. Герасимов. – М., 2021. – Вып. 16, ч. 2. – С. 382–386.*
8. *Юницкий, А.Э. Инженерия. Мир как инженерный проект / Анатолий Юницкий. – Минск: СтройМедиаПроект, 2023. – 320 с.*
9. *Бирич, И.А. Необходимость новой антропологической модели для новой образовательной парадигмы / И.А. Бирич, И.К. Джерелиевская // Гуманизм и пути развития российского образования: коллектив. моногр. / Департамент образования и науки г. Москвы [и др.]; отв. ред. И.А. Бирич. – М., 2023. – Гл. 3. – С. 56–80.*
10. *Об утверждении Основ государственной политики по сохранению и укреплению традиционных российских духовно-нравственных ценностей: Указ Президента Рос. Федерации от 09.11.2022 № 809 // Президент России. – URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/48502 (дата обращения: 11.05.2025).*
11. *Хачатуров, Р.В. Основные возможные этапы освоения космического пространства человечеством в соответствии с теорией Гипервселенной / Р.В. Хачатуров // Парадигма. – 2021. – № 2. – С. 12–20.*
12. *Юницкий, А.Э. Союзное государство России и Беларуси как центр перезагрузки нового мира на биосферный путь цивилизационного развития / А.Э. Юницкий // Космический вектор цивилизационного развития: сб. пленар. докладов междунар. науч.-техн. конф. «Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты» (1988 г., 2019–2023 гг.) / А.Э. Юницкий. – Минск, 2023. – С. 118–157.*
13. *Ведута, Е.Н. Межотраслевой-межсекторный баланс: механизм стратегического планирования экономики / Е.Н. Ведута. – М.: Академ. проект, 2016. – 240 с.*
14. *Курбатов, А.В. Ценностно-смысловое управление развитием обучающихся / А.В. Курбатов // Наука и образование сегодня. – 2018. – № 10 (33). – С. 43–47.*
15. *Богомолов, А.Н. Психолого-педагогические аспекты практико-ориентированного обучения / А.Н. Богомолов // Современное педагогическое образование. – 2019. – № 10. – С. 7–11.*
16. *Кайгородова, М.А. Проектно-ориентированный подход CDIO – инновационная доминанта развития инженерного образования в Алтайском крае / М.А. Кайгородова, О.Ю. Сартакова // Ползуновский вестник. – 2014. – Т. 2, № 4. – С. 245–251.*
17. *Базарный, В.Ф. Здоровье и развитие ребёнка: экспресс-контроль в школе и дома: практ. пособие / В.Ф. Базарный. – М.: АРКТИ, 2005. – 176 с.: ил.*
18. *Лихолетов, В.В. Педагог и наставник – ключевые фигуры формирования образовательно-технологического суверенитета страны / В.В. Лихолетов, А.Г. Абдуллин // Интеграция образования. – 2023. – Т. 27, № 3. – С. 468–489.*
19. *Сапунова, М.А. Работа с родителями как показатель успешного развития ребёнка в условиях современной школы / М.А. Сапунова // Достижения науки и образования. – 2020. – № 6 (60). – С. 24–25.*
20. *Юницкий А.Э. Программа «ЭкоМир» / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 13–14 сент. 2024 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2025. – С. 24–77.*
21. *Хачатуров, Р.В. Формирование единой цивилизации землян путём реализации международного проекта освоения космического пространства / Р.В. Хачатуров // К.Э. Циолковский. Проблемы и будущее российской науки и техники: материалы 52-х науч. чтений памяти К.Э. Циолковского, Калуга, 19–21 сент. 2017 г. / М-во культуры Рос. Федерации [и др.]; редкол.: М.Я. Макаров (пред.) [и др.]. – Калуга, 2017. – 516 с.*

УДК 347.77+629.7

Правовые вопросы создания объектов интеллектуальной собственности в космическом пространстве

А.П. Казакевич

ЗАО «Струнные технологии»,
г. Минск, Беларусь

Рассмотрено правовое регулирование отношений, связанных с результатами интеллектуальной деятельности в космическом пространстве. Актуальность исследования продиктована интенсивным развитием индустриализации ближнего космоса и расширением круга её участников.

С позиции практического применения в условиях активной коммерциализации космоса комплексно проанализированы действующие положения международных договоров и нормы национального законодательства государств – лидеров отрасли. Обозначено, что в полной мере не охвачены вопросы, возникающие в процессе создания и использования объектов интеллектуальной собственности в космосе, определены ключевые критические моменты.

По итогам работы обоснована необходимость установления международного правового режима, регулирующего отношения в области интеллектуальной собственности в космическом пространстве, а также предложены юридические рекомендации по совершенствованию международных и национальных правовых норм, адаптированные к проблемам индустриализации ближнего космоса.

Ключевые слова:
индустриализация космоса, интеллектуальная собственность, космическое право, международное право, общепланетарное транспортное средство (ОТС), программа uSpace.

UDC 347.77+629.7

Legal Issues of Creating Intellectual Property Objects in Outer Space

A. Kazakevich

Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

The article examines the legal regulation of relations regarding the results of intellectual activity in outer space. The relevance of the study is due to the fast development of the industrialization of near space and the expansion of the circle of its participants.

From the perspective of practical application in the context of active commercialization of space, the current provisions of international treaties and national legislation of leading countries in the industry have been comprehensively analyzed. It has been noted that issues arising in the process of creating and using intellectual property in space are not fully covered, and key critical points have been identified.

Based on the results of the work, the need to create an international legal regime regulating relations in the field of intellectual property in outer space is substantiated, and legal recommendations are proposed for improving international and national legal norms which will be adapted to the problems of industrialization of near space.

Keywords:
General Planetary Vehicle (GPV), intellectual property, international law, space industrialization, space law, uSpace program.

Введение

Современный этап развития космической деятельности характеризуется быстрым ростом числа её участников и активным выходом частного бизнеса на данный рынок. Ранее доминировавшие в отрасли государственные агентства уступают место коммерческим инициативам и международным консорциумам, реализующим проекты по производству материалов, биотехнологиям, информационным системам, а также другие инновации во внеземных условиях и вне пределов национальных юрисдикций.

Одним из наиболее последовательных теоретиков и практиков концепции индустриализации ближнего космоса является А.Э. Юницкий, который разработал системную программу uSpace, предусматривающую создание орбитальной инфраструктуры для массового вывода производства за пределы биосферы и направленную на сохранение экологического баланса на планете [1–5]. Центральный элемент программы белорусского инженера и изобретателя – общепланетарное транспортное средство (ОТС), представляющее собой геокосмический самонесущий летательный аппарат, который предназначен для организации безопасного и рентабельного сообщения между Землёй и околоземным пространством, что открывает новые внеземные возможности для коммерческой и научной деятельности.

По данным отчёта Euroconsult, к 2030 г. объём мировой космической экономики достигнет 759 млрд USD [6]. Реализация таких масштабных проектов, как ОТС, потребует привлечения значительных средств от частных и институциональных инвесторов, что невозможно без прозрачных, предсказуемых и общепризнанных международных механизмов правовой охраны результатов деятельности, полученных в космическом пространстве, и защиты прав инвесторов.

На фоне происходящих процессов особую актуальность приобретают вопросы правовой охраны интеллектуальной собственности, создаваемой и используемой в космическом пространстве. Инновационные технологии, технические решения и научные данные, генерируемые на внеземных станциях, базах и в рамках миссий, – ценный нематериальный актив, который требует надёжной юридической защиты. Вместе с тем международное космическое право, заложенное в середине прошлого века, практически не охватывает указанную сферу.

В контексте вышеизложенного цель настоящей работы – выявление существующих правовых пробелов в управлении отношениями, связанными с созданием и использованием объектов интеллектуальной собственности в условиях индустриализации ближнего космоса, и формулирование предложений по совершенствованию международных и национальных правовых норм.

Новизна проведённого исследования состоит в системном подходе к подготовке рекомендаций по правовому регулированию рассматриваемых общественных отношений с учётом перспективной концепции освоения околоземного пространства, предложенной инженером А.Э. Юницким и развиваемой в рамках Глобальных конференций по индустриализации ближнего космоса.

Основы правового регулирования космической деятельности и интеллектуальной собственности

Международно-правовое регулирование космической деятельности формировалось во второй половине прошлого века преимущественно в условиях межгосударственных программ. Основу этой системы составляют следующие договоры [7]:

- Договор о принципах деятельности государств по исследованию и использованию космического пространства, включая Луну и другие небесные тела, или Договор о космосе (1967 г.);
- Соглашение о спасании космонавтов, возвращении космонавтов и возвращении объектов, запущенных в космическое пространство (1968 г.);
- Конвенция о международной ответственности за ущерб, причинённый космическими объектами (1972 г.);
- Конвенция о регистрации объектов, запускаемых в космическое пространство (1976 г.);
- Соглашение о деятельности государств на Луне и других небесных телах (1979 г.).

Перечисленные документы регулируют вопросы использования космоса исключительно в мирных целях, предотвращают национальное присвоение небесных тел, определяют ответственность за ущерб, предусматривают алгоритм оказания помощи экипажам, а также устанавливают правовой статус космических объектов и необходимость их регистрации. Однако аспекты создания и применения результатов интеллектуальной деятельности, полученных в космосе, в них практически не затронуты.

На национальном уровне космическая область находится в правовом поле специализированных актов:

- в США с 2015 г. действует документ «О конкурентоспособности коммерческих космических запусков» [8], разрешающий компаниям добычу ресурсов в космосе и распоряжение ими;

• в Китае в 2021 г. опубликована Белая книга – стратегический документ, обобщающий достижения страны в космической сфере с 2016 г. и определяющий приоритеты на ближайшие пять лет, охватывая такие аспекты, как развитие соответствующих технологий, международное сотрудничество, модернизация правового регулирования и поддержка коммерциализации космической отрасли [9];

• в России до настоящего времени действует принятый в 1993 г. Федеральный закон «О космической деятельности» [10], который затрагивает в большей степени только общие вопросы из этой области: цели и принципы, компетенцию государственных органов, космические объекты и аппараты, безопасность и ответственность. Однако с 2019 г. в стране обсуждается комплексное обновление правового регулирования космической деятельности. Например, планируется уточнить правила коммерческих запусков; внедрить нормы о регистрации и страховании космических аппаратов; прописать основы гражданского оборота результатов НИОКР, полученных в космосе; предусмотреть возможность государственно-частного партнёрства [11].

В 2022–2023 гг. в профильных комитетах Европарламента и Европейской комиссии началась дискуссия о необходимости принятия единого рамочного акта Европейского союза о космической деятельности. Предполагается, что такой документ унифицирует правила запусков и эксплуатации летательных аппаратов, определит права на объекты интеллектуальной собственности, созданные в космосе, установит систему разрешений для трансграничной передачи космических технологий, закрепит ответственность за ущерб [12]. Это подтверждает важность унификации соответствующего законодательства, поскольку иначе невозможно организовать эффективное международное сотрудничество и привлечь крупные частные инвестиции в индустриализацию ближнего космоса.

Отдельного внимания заслуживает деятельность Всемирной организации интеллектуальной собственности (ВОИС) как специализированного учреждения ООН, отвечающего за формирование международных стандартов охраны и использование объектов интеллектуальной собственности. Кроме того, особую значимость имеет функционирование международной патентной системы (Patent Cooperation Treaty – PCT), администрируемой ВОИС и предоставляющей единую международную процедуру подачи заявок на изобретения. Действуя как инструмент защиты инвестиций и коммерческих интересов в условиях глобального рынка, данный правовой механизм позволяет заявителю получить защиту (зафиксировать приоритет) сразу во многих странах. Однако при всех преимуществах рассматриваемой системы следует отметить, что она не предполагает выдачу международного патента: право на изобретение закрепляется за резидентом конкретного государства, и защита предоставляется только под юрисдикцией участников.

Международная платформа PCT и различные региональные патентные режимы изначально разработаны для земных изобретений и территориальной защиты, поэтому охрана интеллектуальных прав действует в пределах национальных юрисдикций и не распространяется на объекты, созданные или используемые в космосе вне правового поля конкретной страны. К тому же не существует формального запрета на применение запатентованных технологий другими лицами во внеземном пространстве, которое не принадлежит какому-либо определённому субъекту. Важно отметить и отсутствие специализированного международного судебного или арбитражного органа, способного разрешать указанные выше споры.

Таким образом, действующая система международного и национального права формировалась под задачи государственных космических программ XX в. и сегодня не учитывает быстро развивающиеся коммерческие проекты, предполагающие внедрение уникальных технологий за пределами Земли. Вопросы создания и охраны объектов интеллектуальной собственности, разработанных в условиях космоса, остаются под регулированием общих норм гражданского и патентного права, не учитывающих особенности экстерриториальности. Это образует правовой вакуум, который остро будет проявляться при реализации программы uSpace.

Особенности создания объектов интеллектуальной собственности в космосе

Создание объектов интеллектуальной собственности в космическом пространстве имеет ряд существенных особенностей, отличающих данный процесс от аналогичной деятельности на Земле. Прежде всего это обусловлено экстерриториальным характером космоса, спецификой правового статуса космических объектов и орбитальных станций, многонациональным составом участников проектов, а также уникальностью окружающей среды.

Во-первых, необходимо учитывать международно-правовой принцип, закреплённый в Договоре о космосе 1967 г., согласно которому космическое пространство не подлежит национальному присвоению [7]. Следовательно, объекты интеллектуальной собственности, созданные в космосе,

фактически возникают в условиях правовой неопределённости. Вместе с тем статьёй 8 указанного договора установлено, что объект, запущенный в космос, сохраняет юрисдикцию и контроль того государства, в реестр которого он внесён. Однако такой подход, как обосновано в [13], не сможет соответствовать глобальному характеру ОТС.

Во-вторых, значительное количество современных космических проектов реализуется в формате международного сотрудничества с привлечением частных компаний, научных организаций и государственных агентств разных стран. При этом действующие правовые режимы предполагают, что права на изобретение могут принадлежать автору, его нанимателю, заказчику, инвестору, государству в зависимости от условий договоров и национального законодательства. В рамках космических миссий появляется проблема распределения прав между заказчиком проекта, оператором станции, непосредственным разработчиком технологии и инвесторами. В многонациональных проектах с участием разных субъектов это порождает риск возникновения противоречий норм различных юрисдикций.

В-третьих, в космосе при невесомости, глубоком вакууме, сверхвысоких и криогенных температурах, неограниченных сырьевых, энергетических и пространственных ресурсах, позволяющих получать новые материалы, биотехнологические продукты и технические решения, разрабатываются уникальные объекты интеллектуальной собственности, которые невозможно создать на Земле [14]. Как неоднократно отмечал А.Э. Юницкий в своих трудах [2, 4, 14], индустриализация ближнего космоса в перспективе приведёт к массовому появлению инновационных технологий и продуктов, что в свою очередь потребует общепризнанной международно-правовой охраны прав авторов и владельцев объектов интеллектуальной собственности.

В-четвёртых, международные процедуры регистрации объектов интеллектуальной собственности ориентированы на охрану прав на территории государств-участников и не распространяются на то, что произведено в условиях экстерриториальности. Это влечёт за собой неопределённость в вопросе, какое право применимо к тем или иным отношениям в рассматриваемых случаях.

Таким образом, создание объектов интеллектуальной собственности в космическом пространстве требует переосмысления действующих правовых механизмов и разработки новых международных норм, учитывающих особенности индустриализации ближнего космоса и перспективы вывода производственной деятельности за пределы земной биосферы.

Проблемы правовой охраны интеллектуальной собственности, создаваемой в космосе

Как упоминалось ранее, вопросы возникновения и охраны объектов интеллектуальной собственности, созданных в условиях космоса, остаются под регулированием общих положений гражданского и патентного права, а значит, особенности экстерриториальности не учитываются. Анализ действующих международных и национальных правовых норм позволяет выделить ряд актуальных проблем, препятствующих эффективной регламентации правоотношений в этой области.

1. Отсутствие специализированных международных правил, регулирующих создание, регистрацию и охрану объектов интеллектуальной собственности, разработанных в космосе.

На сегодняшний день ни один международный договор не содержит норм, прямо касающихся данной сферы. Основные положения международного патентного права ориентированы на территориальный принцип охраны прав, тогда как космическое пространство по своей правовой природе не подлежит национальному присвоению [7]. Это порождает неопределённость в вопросе о применимом праве и механизмах защиты результатов интеллектуальной деятельности.

2. Конкуренция и противоречие национальных правовых систем.

В соответствии с Договором о космосе 1967 г. объект, запущенный в космос, остаётся под юрисдикцией государства регистрации [7]. Однако при реализации многонациональных проектов, включая строительство и эксплуатацию ОТС, а также создание объектов интеллектуальной собственности на его борту, на международных станциях или в составе транснациональных консорциумов, возникает проблема определения территориальной принадлежности. Это обстоятельство, наряду с отсутствием единого правового регулирования, приводит к конкуренции правовых национальных систем и, как следствие, к появлению противоречий между ними.

3. Проблема распределения прав между участниками проекта.

В процессе создания в космосе объектов интеллектуальной собственности участвуют различные субъекты: авторы и их наниматели, инвесторы и заказчики проектов, владельцы и операторы космических объектов. Отсутствие унифицированных норм о разграничении прав на результаты интеллектуальной деятельности, полученные

вне национальных территорий, порождает споры о праве авторства, порядке использования таких объектов и распределения доходов.

4. Ограничения действующих международных регистрационных процедур.

Существующий механизм подачи международной заявки по системе PCT не адаптирован к особенностям космической деятельности. Он исходит из территориальной природы патентного права и не предусматривает механизмов регистрации прав на объекты интеллектуальной собственности, созданные вне юрисдикции государств-участников. Вопросы патентования технологий, полученных на международных орбитальных станциях или вне Земли, остаются нерегламентированными.

5. Отсутствие единого международного реестра объектов интеллектуальной собственности, созданных в космосе.

На сегодняшний день мировое сообщество не располагает централизованным международным механизмом фиксации факта создания объектов интеллектуальной собственности в космосе, их первичной регистрации и определения авторства. Это существенно осложняет как защиту прав авторов и владельцев, так и последующее коммерческое использование технологий.

6. Неопределённость правового статуса объектов интеллектуальной собственности в случае перемещения между юрисдикциями.

В условиях, при которых объекты интеллектуальной деятельности могут перемещаться в космосе между станциями, модулями, кораблями или платформами, принадлежащими разным субъектам, возникает проблема определения правового статуса таких активов в каждый момент времени. При этом отсутствует чёткий порядок признания прав при переходе между юрисдикциями, а также закрепления обязательств сторон при использовании данных объектов.

7. Конфликт между политикой открытого доступа к научным данным и коммерческими интересами компаний.

Исторически деятельность в космическом пространстве регулировалась международным правом, основанным на принципах сотрудничества, обмена научными данными и обеспечения открытого доступа к полученной информации. Однако с активным вовлечением в космическую деятельность частного сектора и формированием полноценного рынка орбитальных услуг, товаров и технологий всё более очевиден конфликт между общечеловеческими интересами в свободном распространении знаний, полученных в результате исследований вне Земли, и коммерческими интересами компаний, инвестирующих значительные средства в разработки, инфраструктуру и производство на орбите.

Указанные проблемы не только замедляют развитие коммерческой космической индустрии, но и создают риски появления международных споров, препятствуют привлечению инвестиций и реализации перспективных проектов в рамках программы безракетной индустриализации ближнего космоса, разработанной инженером А.Э. Юницким.

Предложения по совершенствованию правовой охраны интеллектуальной собственности, создаваемой в космосе

Для обеспечения эффективного правового регулирования отношений, связанных с созданием и использованием объектов интеллектуальной собственности в космосе, представляется целесообразным внедрить комплекс мер, включающих как совершенствование международной договорной регламентации, так и развитие специальных национальных и наднациональных правовых режимов.

1. Разработка международного соглашения о правовом статусе объектов интеллектуальной собственности, создаваемых в космосе.

На уровне ООН и специализированных агентств (в частности, ВОИС и Комитета ООН по космосу) необходимо инициировать подготовку многостороннего соглашения, регулирующего порядок признания, регистрации и охраны прав на объекты интеллектуальной собственности, созданные в условиях экстерриториальности. Документ должен определить жизненный цикл результатов интеллектуальной деятельности без привязки к конкретной юрисдикции, установить разграничение прав между участниками международных космических проектов, а также правила разрешения возникающих споров.

2. Формирование международного реестра объектов интеллектуальной собственности, созданных в космосе.

В рамках вышеуказанного документа целесообразно внедрить специальную информационную систему для регистрации объектов интеллектуальной собственности, создаваемых на земных орбитах или за их пределами. Такой реестр позволит официально фиксировать авторство, дату разработки и принадлежность прав на объекты независимо от национальной юрисдикции.

3. Установление специальных правовых режимов на борту орбитальных станций и космических объектов.

Следует закрепить нормы о применимости нового документа к объектам интеллектуальной собственности, созданным на космических станциях, модулях и базах, в том числе на Луне и других космических телах, вне зависимости от национальной принадлежности, если между участниками проекта не заключено иное соглашение.

4. Регламентация распределения прав на объекты интеллектуальной собственности между участниками многонациональных космических проектов.

Для снижения юридических рисков рекомендуется разработать типовые международные соглашения, устанавливающие порядок распределения прав на создаваемые объекты интеллектуальной собственности, и сформулировать условия использования и коммерциализации результатов совместной деятельности. При этом следует закрепить общий алгоритм на случай отсутствия подобного договора.

Предлагаемые меры позволят устранить правовую неопределённость, обеспечить охрану прав авторов и инвесторов, а также условия для активного развития космической индустрии и технологической кооперации в рамках индустриализации ближнего космоса. Кроме того, такие меры послужат прочной базой для формирования концепции унифицированного космического права. В перспективе возможно создание универсальных правовых актов, охватывающих основные аспекты регулирования космической деятельности, включая вопросы интеллектуальной собственности, транспортных систем, добычи ресурсов и др.

Заключение

Проведённое исследование показало, что в процессе создания объектов интеллектуальной собственности в космосе, количество которых будет стремительно расти в ходе реализации программы uSpace, возникает ряд серьёзных правовых вызовов. Экстерриториальный характер космоса, многонациональный состав участников космических проектов и отсутствие специализированных международных норм становятся причиной неясности в вопросах признания, распределения и защиты прав на результаты интеллектуальной деятельности.

Современные международные нормы в сфере космического и патентного права не охватывают специфики создания объектов интеллектуальной собственности вне национальных юрисдикций, а существующие процедуры ориентированы на территориальную модель охраны прав, что ограничивает возможности их применения к объектам, возникающим в космосе.

Исходя из анализа выявленных проблем, предложен комплекс правовых мер:

- разработка международного соглашения о правовом статусе объектов интеллектуальной собственности, созданных в космосе;
- формирование международного реестра таких объектов;
- установление специальных правовых режимов на космических комплексах.

Кроме того, показана необходимость регламентации распределения прав на полученные результаты между участниками многонациональных космических проектов.

Представленные в работе выводы и предложения могут лечь в основу правотворческой деятельности в рамках международных организаций, а также использоваться при подготовке многосторонних соглашений и национальных актов, регулирующих космическую деятельность.

Список основных источников

1. *Юницкий, А.Э. В космос… на колесе / А.Э. Юницкий // Техника – молодёжи. – 1982. – N° 6. – С. 34–36.*
2. *Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А.Э. Юницкий. – Гомель: Инфотрибо, 1995. – 337 с.: ил.*
3. *Юницкий, А.Э. Исторические предпосылки программы SpaceWay как единственного пути устойчивого развития цивилизации технократического типа / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии», под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 23–29.*
4. *Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А.Э. Юницкий. – Силакрогс: ПНБ принт, 2019. – 576 с.*
5. *Юницкий, А.Э. Программа SpaceWay – единственно возможный сценарий спасения земной технократической цивилизации от угасания и гибели / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии», под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2019. – С. 31–39.*

6. *Marchand, E. Euroconsult Forecasts $75 Billion in Growth for Middle East's Space Sector by 2032 / E. Marchand // Space Daily. – URL: https://www.spacedaily.com/reports/Euroconsult_forecasts_75_Billion_in_growth_for_Middle_Easts_Space_Sector_by_2032_999.html. – Publ. date: 09.01.2024.*
7. *Международное космическое право: документы Организации Объединённых Наций // UNOOSA. – URL: https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2017/stspace/stspace61rev_2_0_html/V1703166-RUSSIAN.pdf (дата обращения: 08.05.2025).*
8. *H.R.2262 – U.S. Commercial Space Launch Competitiveness Act: 114th Congress (2015–2016): Public Law 114–90 Nov. 25, 2015 // Congress.gov. – URL: https://www.congress.gov/bill/114th-congress/house-bill/2262 (date of access: 08.05.2025).*
9. *China's Space Program: A 2021 Perspective // The State Council Information Office of the People's Republic of China. – URL: http://english.scio.gov.cn/whitepapers/2022-01/28/content_78016877.htm. – Publ. date: 28.01.2022.*
10. *О космической деятельности: Закон РФ от 20 авг. 1993 г. N° 5663-I: с изм. и доп. от 11 дек. 1993 г. N° 1282, от 29 нояб. 1996 г. N° 147-ФЗ // Система ГАРАНТ. – URL: https://ivo.garant.ru/#/document/136323/paragraph/25483:0 (дата обращения: 08.05.2025).*
11. *Бузько, Р. Правовое регулирование космической деятельности в России / Р. Бузько // Buzko Krasnov. – URL: https://www.buzko.legal/content-ru/pravovoe-regulirovanie-kosmicheskoy-deyatelnosti-v-rossii. – Дата публ.: 20.11.2020.*
12. *Gleason, M.P. Preparing for the EU Space Act and Its Potential Influence on the Future of Space Traffic Management / M.P. Gleason // The Space Review. – URL: https://www.thespacereview.com/article/4961/1. – Publ. date: 31.03.2025.*
13. *Казакевич, А.П. Действие правовых норм при строительстве и эксплуатации общепланетарного транспортного средства и его инфраструктуры / А.П. Казакевич // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 438–444.*
14. *Юницкий, А.Э. Инженерия. Мир как инженерный проект / Анатолий Юницкий. – Минск: СтройМедиаПроект, 2023. – 320 с.*

УДК 629.78+504.06+316.42

Наука и кризис современной цивилизации: индустриализация космоса и безракетные геокосмические технологии

А.Э. Юницкий[1,2]
доктор философии транспорта

С.В. Артюшевский[2,3]

Д.В. Бочкарёв[2,3]
кандидат технических наук

[1] ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

[2] ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

[3] Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Беларусь

Сегодня наука имеет важное значение для развития земной цивилизации, при этом порождая и усугубляя глобальные кризисы – экологические, энергетические, социальные – и тут же находя и предлагая решения для их ликвидации. Такова многогранная роль науки в современном мире – круговорот открытий: одно открытие становится причиной возникновения проблемы, другое служит для устранения последствий и т. д.

Цель работы – анализ противоречий научного прогресса на примере индустриализации космоса, включая концепцию безракетных геокосмических технологий А.Э. Юницкого.

Традиционные ракетные технологии, даже при всех своих достижениях, демонстрируют фундаментальные ограничения: высокую экологическую нагрузку, экономическую неэффективность и технологический потолок, обусловленный законами физики. В качестве альтернативы рассматривается концепция безракетной индустриализации космоса инженера Юницкого, предлагающая миру новый революционный подход через создание общепланетарного транспортного средства – геокосмического самонесущего летательного аппарата планетарных размеров.

Такая транспортно-логистическая система обеспечит значительное снижение стоимости грузоперевозок, экологическую безопасность и беспрецедентную пропускную способность, открывая путь к устойчивому освоению околоземного пространства и доступ к бесконечным космическим ресурсам. Однако реализация идеи безракетной индустриализации космоса требует не только технологических прорывов, но и смены парадигмы мышления – перехода от антропоцентрической эксплуатации космического пространства к гармоничному взаимодействию с ним, основанному на принципах космической этики и долгосрочной ответственности. Подчёркнуто, что выбор между ракетными и безракетными технологиями имеет как техническое, так и философское значение, определяя будущее человечества в условиях глобальных вызовов.

Ключевые слова:
безракетные технологии, индустриализация космоса, космическая этика, кризис, наука, общепланетарное транспортное средство (ОТС), экологическая ответственность.

UDC 629.78+504.06+316.42

Science and Crisis of Modern Civilization: Space Industrialization and Non-Rocket Geocosmic Technologies

A. Unitsky [1, 2]
Dr. of Philosophy
in Information Technologies
(Transport)

S. Artyushevskiy [2, 3]

D. Bochkaryov [2, 3]
Ph.D. in Engineering Sciences

[1] Astroengineering Technologies LLC,
Minsk, Belarus

[2] Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

[3] Belarusian State University
of Transport,
Gomel, Belarus

Today, science plays a key role in the development of Earth's civilization, while simultaneously generating and exacerbating global crises, such as environmental, energy, and social ones, at the same time finding and proposing solutions to eliminate them. This is the multifaceted role of science in the modern world: a cycle of discoveries in which one leads to new problems and another helps resolve their consequences, and so on.

The aim of this paper is to analyze the contradictions of scientific progress using the example of space industrialization, including the concept of non-rocket geocosmic technologies proposed by A. Unitsky.

Traditional rocket technologies, despite their achievements, demonstrate fundamental limitations: high environmental impact, economic inefficiency, and technological ceiling caused by the laws of physics. As an alternative, the concept of non-rocket space industrialization developed by engineer A. Unitsky is being considered, offering the world a new and revolutionary approach through the creation of a General Planetary Vehicle – a geocosmic self-supporting spacecraft of planetary dimensions.

Such a transport and logistics system would ensure a significant cost reduction in cargo transportation, environmental safety, and unprecedented throughput capacity, paving the way for more sustainable exploration of near-Earth space and access to unlimited space resources. However, the implementation of the idea of non-rocket space industrialization requires not only technological breakthroughs but also a paradigm shift in thinking – the transition from the anthropocentric exploitation of outer space to harmonious interaction with it, based on the principles of cosmic ethics and long-term responsibility. The article emphasizes that the choice between rocket and non-rocket technologies has not only technical but also philosophical significance, determining the future of humanity in the face of global challenges.

Keywords:
cosmic ethics, crisis, environmental responsibility, General Planetary Vehicle (GPV), non-rocket technologies, science, space industrialization.

Введение

Двойственная роль науки в создании и преодолении глобальных кризисов

Несмотря на противоречивые мнения учёных о значении науки в мировых кризисах [1, 2], именно она играет всё более существенную роль в преодолении всевозможных вызовов, с которыми сталкивается человечество. Наука предоставляет нам знания, технологии и инструменты для понимания проблем и их причин, для поиска эффективного пути по устранению их последствий и предотвращению повторного появления. Она традиционно занимает центральное место в общественном сознании как ключевой двигатель прогресса, важнейший фактор социально-экономического развития и инструмент преодоления кризисных ситуаций [3, 4]. Однако в современном дискурсе сформировались две полярные позиции относительно роли науки в контексте планетарных вызовов, поскольку можно утверждать, что именно её развитие стало причиной (прямой или косвенной) возникновения глобальных проблем – экологических, энергетических, социальных, иных, ставящих под вопрос устойчивость земной человеческой цивилизации [5, 6].

По мере цивилизационного развития росли запросы *Homo sapiens*, увеличивалось потребление ресурсов, становилось больше отходов жизнедеятельности, не только биогенных, но и техногенных. Человек превращался в потребителя товаров, услуг, энергии, информации. Это привело к локальным и планетарным изменениям климата, потере биоразнообразия, вооружённым конфликтам, неравенству и миграции людей и животных. В результате участились чрезвычайные ситуации (эпидемии, лесные пожары, наводнения), наблюдается нехватка продовольствия, рост бедности и загрязнение окружающей среды, что требует неотложных мер реагирования. Правильную и комплексную реакцию в таких условиях может дать только наука, её прогресс находит и внедряет решения для преодоления подобных глобальных кризисов.

С одной стороны, часть экономического сообщества выражает скептицизм по поводу потенциала науки как катализатора экономического роста. Несмотря на устойчивую положительную динамику многих показателей, эксперты обращают внимание на исчерпание «низко висящих плодов» – наиболее доступных и быстро реализуемых научно-технических достижений [7]. По мнению учёных, фундаментальные открытия уже осуществлены, базовые технологические решения разработаны, а дальнейшее продвижение требует колоссальных усилий, времени и ресурсов, что создаёт эффект замедления прогресса, когда каждое новое достижение даётся всё труднее.

С другой стороны, нельзя отрицать, что научно-технический прогресс привёл человечество к беспрецедентному уровню развития, подарив технологии, которые способствуют ликвидации последствий, предупреждают и предотвращают глобальные кризисы, например:

- изменение климата: научные исследования помогают понять причины данного явления, роль парниковых газов и озонового слоя, позволяют разработать инновационные технологии для снижения выбросов загрязняющих веществ в воздух, почву и воду, провести адаптацию растительного и животного мира к последствиям климатических изменений;
- мировой голод: учёные непрерывно трудятся над рядом таких задач, как восстановление плодородия опустыненных и истощённых земель, селекция растений и животных, создание новых, более эффективных способов подкормки и удобрения, а также инновационных технологий хранения продовольствия;
- здоровье человека: медицина как наука (научная медицина) ежегодно изобретает новые лекарства и вакцины для предотвращения различного рода заболеваний и борьбы с ними, разрабатывает немедикаментозные методы оздоровления и профилактики, а также передовые методы, инструменты и специализированное оборудование для лечения человека;
- загрязнение окружающей среды: наука предлагает технологии очистки воды, воздуха и почвы, помогает модернизировать существующие производства для утилизации отходов и создавать новые экологически чистые технологии и предприятия в различных отраслях – транспорте, энергетике, металлургии, сельском хозяйстве.

Таким образом, наука сегодня оказывается и спасителем, и заложником глобальных процессов, требуя переосмысления своих целей и методов. Необходим более гибкий, своевременный и комплексный подход для её включения в регулирование сложных поликризисов, в том числе поощрение научной культуры, способствующей участию общественности в политических, нормативных и финансовых действиях.

Политическим лидерам важно взаимодействовать с наукой в процессе принятия решений в кризисных ситуациях, используя доказательства из различных систем знаний, так как интеграция с научными идеями обеспечивает наиболее целостный ответ. Эффективная и быстрая мобилизация знаний может быть сложной задачей, особенно при участии нескольких секторов науки и экономики.

В связи с этим следует сделать научные результаты применимыми на практике, удобными для пользователя и актуальными, а также поощрять учёных быть более открытыми для совместной работы. Ключевая цель – вовремя предоставить лицам, принимающим решения, полезные знания.

Космос как новое поле для технологического прорыва и этических дилемм

Сегодняшний мир оказался заложником парадоксальной ситуации: научно-технические достижения, позволившие человечеству совершить невиданный рывок в развитии, одновременно стали источником системных кризисов. Особенно ярко эта двойственность проявляется в космической сфере, где традиционные ракетные технологии, открывшие человечеству дорогу к звёздам, обернулись новой угрозой для хрупкой экосистемы Земли – для её биосферы.

Текущий этап освоения космоса, основанный на технологиях середины XX в., демонстрирует три фундаментальных ограничения.

1. Экологический кризис. Разрушение озонового слоя при запуске космических ракет и образование озоновых дыр размером в сотни километров по времени совпали с началом полётов Space Shuttle. Например, 300 частых запусков космического челнока достаточно для полного разрушения озонового слоя планеты [8]. Наиболее губительными для озона продуктами сгорания ракетного топлива являются окись азота (NO), соединения хлора (Cl_2, HCl), гидроксид (OH) и пары воды при работе жидко- и твёрдотопливных реактивных двигателей, у которых температура реактивной струи превышает 3000 °C, а скорость её истечения – 3000 м/с. После запуска ракеты-носителя в течение примерно 1 ч происходит перестройка структуры ионосферы на расстоянии до 2000 км, что приводит к её волновым возмущениям различного масштаба.

2. Экономическая неэффективность. Даже революционные достижения SpaceX, снизившие стоимость вывода тонны груза на переходную орбиту до 3,4 млн USD [9], не решают принципиальной проблемы – ракетные технологии по своей природе останутся чрезмерно дорогими и в будущем, что исключает их применение при широкомасштабном (индустриальном) освоении космического пространства.

3. Технологический потолок. Физические ограничения, сформулированные ещё К.Э. Циолковским, делают ракеты неэффективными транспортными системами: 60–70 % их массы составляет топливо, тогда как полезная нагрузка редко превышает 2–5 %. Это фундаментальное ограничение, преодолеть которое в рамках реактивной парадигмы невозможно.

В данном контексте концепция безракетной индустриализации космоса (БИК), разработанная инженером Юницким и подробно изложенная в его научной монографии [10], демонстрирует принципиально иной путь. Для перемещения пассажиров и грузов предлагается задействовать общепланетарное транспортное средство (ОТС), которое представляет собой геокосмический транспортно-инфраструктурный комплекс многоразового использования. ОТС – это самонесущий летательный аппарат, способный за один рейс выводить на орбиту до 10 млн тонн грузов и до 10 млн пассажиров при снижении в тысячи раз затрат на доставку полезного груза на экваториальные круговые орбиты по сравнению с ракетами-носителями.

Для того чтобы понять масштаб преимуществ ОТС, достаточно сопоставить следующие факты:

- мировая ракетная космонавтика, на развитие которой потребовались усилия всей земной цивилизации, может выводить на орбиту не более 300–400 тонн полезной нагрузки ежегодно (менее 0,1 г груза на одного жителя планеты) [10], и это при затратах в триллионы долларов;
- ОТС способно выполнять до 100 рейсов в год, обеспечивая беспрецедентные объёмы грузопотока;
- транспортная работа всей современной космонавтики эквивалентна работе одной запряжённой в телегу лошади – она тоже может ежегодно перевозить 300–400 тонн грузов на расстояние 300–400 км [10].

Перенос промышленности в космос – не просто техническая задача, а цивилизационный императив. История показывает аналогии: первобытные люди, начавшие выносить вредные производства (обработка шкур, приготовление пищи и др.) за пределы жилищ, смогли улучшить условия жизни и не умирать в 20 лет от рака лёгких. Сегодня человечество стоит перед подобным выбором: либо мы переместим индустрию за пределы биосферы, либо продолжим разрушать свой единственный дом – биосферу планеты.

Космос как промышленная площадка предлагает уникальные преимущества:

- практически неисчерпаемые ресурсы: энергия (солнечная, в миллионы раз превышающая земные потребности), минеральное сырьё (астероиды, лунные ресурсы), пространство (неограниченные площади для размещения производств);
- уникальные технологические условия: невесомость (возможность создания принципиально новых технологий и материалов), глубокий вакуум (идеальная среда для многих

производственных процессов), технологическая чистота (отсутствие пыли, микроорганизмов, гравитационных искажений).

В качестве альтернативы ОТС предлагается космический лифт, разрабатываемый NASA на основе идей К.Э. Циолковского и Ю.Н. Арцутанова. При этом он имеет ряд существенных недостатков: ограниченная пропускная способность (не более 2500 т/год, т. е. менее 1 г на жителя планеты), технологическая сложность создания несущего троса (по своей инженерной сути – самонесущей канатной дороги) длиной более 50 000 км (для размещения массивного противовеса), уязвимость к космическому мусору и метеоритам [11].

Любые транспортные системы – земные, геокосмические и космические – должны подчиняться фундаментальным законам физики, в частности сохранения энергии, импульса, момента импульса, движения центра масс. ОТС А.Э. Юницкого – единственная на сегодняшний день инженерная концепция, которая полностью соответствует данным законам при использовании для выхода в космос только внутренних сил системы (принцип барона Мюнхгаузена) – центробежной силы ленточных маховиков, движущихся внутри вакуумных каналов вокруг планеты с космической скоростью. Проект предлагает технически и экономически реализуемое решение и при этом гарантирует биосферную экологическую безопасность.

При глубоком анализе противоречий научного прогресса в контексте индустриализации космоса возникает принципиальный вопрос: способна ли современная наука предложить выход из кризиса, который она же во многом и создала? Опыт развития ракетной космонавтики и изучение альтернативных концепций показывают, что требуется не постепенное совершенствование существующих технологий, а радикальный пересмотр принципов космического транспорта. Концепция БИК инженера Юницкого представляет собой именно такой – целостный (комплексный) и революционный – подход, который сочетает физическую обоснованность, экономическую эффективность и экологическую безопасность.

Настоящее исследование ставит своей целью осуществить философский анализ диалектической природы современного научно-технического прогресса через призму космической индустриализации, рассматривая:

1) критический аспект, изучающий, как традиционные научные подходы:

- углубляют и усугубляют цивилизационные кризисы (экологический, социальный, антропологический);
- воспроизводят в космической экспансии земные модели эксплуатации и неравенства;
- демонстрируют ограниченность технократической рациональности (по М. Хоркхаймеру и Т. Адорно) [12];

2) конструктивный аспект, показывающий, каким образом концепция БИК инженера Юницкого:

- предлагает альтернативную парадигму научного развития и технического прорыва;
- реализует принципы устойчивого прогресса в освоении космоса;
- способствует преодолению противоречий между технологической необходимостью и экологической ответственностью;

3) синтетический аспект, выявляющий условия, которые содействуют:

- гармоничному развитию космических технологий и космической индустриализации;
- преобразованию науки из источника кризисов в инструмент их разрешения;
- формированию новой этики технологического развития.

Особое внимание уделяется философскому осмыслению:

- противоречий между традиционными (ракетными) и инновационными (безракетными) подходами в геокосмической логистике;
- этических дилемм космической экспансии;
- возможностей синтеза научного прогресса и экологической ответственности.

Работа призвана продемонстрировать, что выбор технологических моделей космической индустриализации является не только техническим, но и фундаментально философским вопросом, определяющим траекторию развития земной человеческой цивилизации.

Наука как источник кризисов цивилизации: между технократией и ответственностью

Техногенные угрозы: обратная сторона прогресса

Современная наука, реализуя многовековую мечту человечества о покорении природы, неожиданно сама стала источником экзистенциальных угроз. Технократический подход, рассматривающий природу как ресурс для безграничной эксплуатации, привёл к системным кризисам.

1. Экологическая катастрофа достигла беспрецедентных масштабов: ежегодно производится более 6 млрд тонн

отходов, из них 400 млн тонн – опасных (UNEP, 2023) [13], с 1970 г. исчезло 58 % популяций позвоночных (WWF) [14], наблюдается прогрессирующее разрушение защитного озонового слоя. Данные цифры свидетельствуют о том, что антропогенное воздействие превзошло адаптационные возможности биосферы.

2. Ядерный парадокс иллюстрирует двойственность научного прогресса: 12 500 боеголовок (SIPRI, 2023) [15] образуют систему гарантированного взаимного уничтожения, где технологический триумф оборачивается постоянной угрозой существованию цивилизации.

3. Цифровая трансформация сознания – новый вызов: 6 ч 58 мин ежедневного онлайн-потребления (Data-Reportal, 2023) [16] сопровождаются 40%-м снижением концентрации внимания у пользователей за два десятилетия (Microsoft) [17]. Наука, создавшая цифровые технологии, теперь вынуждена изучать их деструктивное влияние на психику.

Кризис научной рациональности

Идеалы Просвещения, провозгласившие разум главным инструментом прогресса, столкнулись с неожиданными последствиями:

- технологические инновации всё чаще обслуживают интересы узкой элиты: 78 % разработок минувшего десятилетия ориентированы на 1 % населения (MIT) [18];
- капитализация научных достижений привела к возникновению так называемой экономики слежки, где знания используются для манипуляции поведением;
- инструментализация разума разрушила баланс между технологическим развитием и гуманитарными ценностями, о чём предупреждали ещё представители Франкфуртской школы.

Этот кризис проявляется особенно ярко в космической отрасли, где коммерциализация опережает осмысление этических и экологических последствий.

Космическая индустрия: технократия без границ

Ракетно-космическая отрасль стала символом противоречий современного технократического подхода:

- каждый запуск тяжёлой ракеты не только приближает человечество к звёздам, но и усугубляет экологический кризис, создавая порочный круг технологического развития [19];
- доминирование коммерческих и военных интересов (85 % запусков космических ракет-носителей) демонстрирует подмену научных идеалов рыночной логикой;
- фокусировка на престижных проектах (космический туризм, марсианские амбиции) отвлекает ресурсы от решения земных проблем.

Сложившаяся ситуация требует переосмысления самой парадигмы научного прогресса:

- необходим переход от антропоцентрической модели к биоцентрическому мировоззрению, где технологическое развитие согласуется с экологическими ограничениями;
- космическая экспансия должна рассматриваться не как бегство от земных проблем, а как их системное решение, но только при условии радикального изменения технологических подходов на Земле и в космосе;
- этические принципы обязаны стать не дополнением, а основой научно-технического развития, что особенно актуально в контексте индустриализации космоса.

Анализ подводит нас к ключевому вопросу: способна ли наука, осознав свою роль в создании кризисов, служить инструментом их преодоления? Ответ найдём при рассмотрении альтернативных подходов к космической индустриализации.

Индустриализация космоса: между техноутопией и экзистенциальным риском

Амбивалентность ракетного прогресса: цена технологического рывка

Современная космическая индустрия, представленная частными корпорациями и государственными программами, демонстрирует парадоксальную двойственность. С одной стороны, мы наблюдаем беспрецедентные технологические достижения, а с другой – нарастающий комплекс сопутствующих проблем, ставящих под вопрос возможность устойчивого космического развития.

Анализируя экономико-технологические аспекты, нельзя не отметить определённые успехи.

1. Имеются достижения в снижении стоимости: цена вывода тонны полезной нагрузки на земную орбиту упала с астрономических 20 млн USD в эпоху Space Shuttle до менее впечатляющих 3,4 млн USD благодаря инновациям SpaceX. Этот прогресс, однако, следует рассматривать в более широком контексте глобального неравенства, когда доступ к космическим технологиям остаётся привилегией узкого круга государств и корпораций, причём ограничивается небольшим количеством технологий, преимущественно для научных исследований и в интересах военно-промышленных комплексов.

2. Повторное использование компонентов (80 % для первых ступеней) представляет собой важный шаг к устойчивости [20]. Вместе с тем возникает философский вопрос: можно ли говорить об истинной устойчивости, когда сама парадигма реактивного движения остаётся принципиально ограниченной физическими законами для достижения целей индустриального освоения космоса – ближнего и дальнего?

3. Прорыв в двигателестроении (рост КПД метановых двигателей на 15 %) действительно впечатляет [21]. При этом данный технический успех меркнет перед нарастающими экологическими последствиями, в том числе из-за прогрессирующего разрушения озонового слоя планеты при частом пуске ракет-носителей.

Экологические и социальные издержки раскрывают обратную сторону прогресса.

1. Атмосферные последствия в ионосфере и озоновом слое приобретают особую значимость в контексте глобального климатического кризиса. Кумулятивный эффект от регулярных запусков ракет может оказаться серьёзнее, чем предполагают текущие оценки, так как «выхлоп» ракеты – высокоскоростная (более 3 км/с) высокотемпературная (более 3000 °C) плазма реактивной струи, выброшенная в ионосфере, – кроме уничтожения миллионов тонн озона приводит и к другим негативным явлениям в планетарной экологии.

2. Стратосферное загрязнение (пероксид азота, алюминиевые частицы, иные продукты горения ракетного топлива) представляет собой неявный, но потенциально более опасный вид воздействия, последствия которого могут обнаружиться через десятилетия [22].

3. Экономическая концентрация 80 % рынка у трёх игроков, в список которых не попала Россия (с Россией и Индией эта доля составляет 90,1 % [23]), обуславливает воспроизведение на космическом уровне земных моделей неравенства и не соответствует изначальным гуманистическим идеалам космической экспансии.

Философский анализ выявляет более глубокие противоречия. Технократическая доктрина мультипланетарности при всей своей привлекательности несёт в себе:

- антропоцентрический империализм – перенос эксплуататорских моделей взаимоотношений с природой и людьми в космическое пространство;
- социальный элитизм – превращение космоса в зону интересов узкой группы миллиардеров;
- экономический редукционизм – сведение космической экспансии к вопросу рентабельности и рыночной конкуренции.

Грандиозные проекты: между научной фантастикой и экономической реальностью

Марсианская авантюра как социокультурный феномен. Идея колонизации Марса [24], активно продвигаемая технооптимистами, при ближайшем рассмотрении обнаруживает серьёзные противоречия.

1. Биомедицинские ограничения (радиационное облучение 0,25 Зв/год [25]) ставят под сомнение возможность длительного пребывания человека на Красной планете без катастрофических последствий для здоровья, не говоря уже о том, что ещё во время полёта на Марс экипаж космического корабля может получить смертельную дозу межпланетной радиации. Эти факты заставляют задуматься, не является ли марсианский проект своеобразной формой технологического самообмана.

2. Психологические исследования (более 40 % депрессий в эксперименте HI-SEAS [26]) свидетельствуют о фундаментальной неготовности человека к длительной изоляции в чуждой среде. Возникает закономерный вопрос: какие социальные и психологические мутации потребуются для адаптации к марсианским условиям?

3. Экономические расчёты демонстрируют фантастическую инвестиционную ёмкость проекта (по данным И. Маска, 1 трлн USD для минимальной колонии [27]). В контексте земных проблем эта цифра выглядит особенно провокационно, заставляя задуматься о приоритетах современной цивилизации.

Философская критика марсианских амбиций выявляет:

- эскапистский подтекст – бегство от земных проблем вместо их решения;
- научно-технический нарциссизм – вера в возможность полного контроля над враждебной средой;
- культурный провинциализм – перенос земных социальных моделей в принципиально иную среду.

Добыча ресурсов в космосе – экономический мираж? Потенциальные богатства космоса (гелий-3, редкоземельные элементы, металлические астероиды) действительно впечатляют. Вместе с тем для их добычи существует ряд препятствий.

1. Имеет место энергетический парадокс: затраты ресурсов (миллионы и даже десятки миллионов долларов на каждую тонну сырья), времени (месяцы и даже годы на космическую логистику) и энергии (сотни тонн топлива на каждую тонну груза) на доставку метеоритного или лунного материала к Земле ставят под сомнение экономическую целесообразность добычи космического сырья.

Не превратится ли такая промышленность в подобие алхимического поиска философского камня с удельной стоимостью, превышающей стоимость золота?

2. Экологические последствия космической добычи остаются практически неизученными. Не рискуем ли мы, пытаясь спасти земную экосистему, создать для неё новые проблемы бесчисленными запусками ракет, космическими материалами, сырьём и мусором?

3. Правовой вакуум в вопросах собственности на космические ресурсы готовит почву для новых форм колониализма. Как избежать воспроизводства исторических ошибок в современных условиях?

Космоэтика: в поисках новой парадигмы ответственности

Колониальное наследие в космической экспансии. Исторические параллели между освоением новых земель и космического пространства прослеживаются в следующих аспектах:

- правовых доктринах, воспроизводящих логику *Terra nullius*;
- культурных конфликтах вокруг космических артефактов;
- экономической концентрации орбитальных ресурсов.

Эти явления заставляют задуматься: способно ли человечество выйти за рамки своей колониальной ментальности при освоении космоса?

Философские антиномии космической деятельности. В академическом дискурсе сталкиваются:

- трансгуманистический императив – космос как пространство постчеловеческого будущего;
- биоцентрические принципы – ценность космоса вне утилитарных интересов;
- планетарная защита – этические обязательства перед потенциальными внеземными формами жизни.

Такой концептуальный конфликт отражает более глубокий кризис антропоцентрического мировоззрения в космическую эру.

Милитаризация космоса: новая гонка вооружений. По данным различных статистических источников, 25–35 % [28] спутников имеют военное (или околовоенное) назначение (например, бюджет космических сил США – 24,5 млрд USD). Это свидетельствует о тревожной тенденции. Теоретические разработки (орбитальное доминирование, звёздные войны 2.0) демонстрируют, как земные конфликты проецируются в космическое пространство.

Заключительная рефлексия

Современные работы учёных [29, 30] показывают, что текущая модель ракетного освоения космоса является неустойчивой, и подтверждают необходимость смены парадигмы. Альтернативные подходы, такие как БИК инженера Юницкого, предлагают принципиально иной путь, свободный от недостатков ракетной парадигмы.

Британский писатель и футуролог А. Кларк в эссе The Challenge of the Spaceship [31] противопоставлял «варварство экспансии» и «зрелость сотрудничества», предсказывая, что выход в космос станет для человечества «экзаменом на этическую пригодность». Это наталкивает на умозаключение, что выбор между космическим хищничеством и космическим сотрудничеством станет определяющим для будущего цивилизации и потребует не только технологических инноваций, но и глубокого переосмысления наших ценностных ориентиров, этических принципов и отношения к космосу как пространству человеческой деятельности.

Безракетная индустриализация космоса как альтернатива: философско-технологический синтез

Концепция изобретателя Юницкого: инженерное воплощение космизма – «Земля – для жизни. Космос – для индустрии»

Современная научная мысль, рассматривая перспективы технологического развития в области космической индустриализации, сталкивается с фундаментальной эпистемологической проблемой: с одной стороны, мы не можем с уверенностью предсказать конкретные пути эволюции техники и характер новых открытий, а с другой – имеем чёткое понимание неизменных физических законов, которые обуславливают любые вероятные технологические решения. Эта диалектика между неопределённостью будущего и определённостью физических законов создаёт методологическую базу для анализа возможностей космической индустриализации.

В данном контексте особую значимость приобретают четыре фундаментальных закона сохранения: энергии, импульса, момента импульса и движения центра масс системы. Такие принципы, многократно подтверждённые экспериментально и составляющие основу классической механики, образуют незыблемый теоретический фундамент, на котором должно строиться любое инженерное решение в области космического транспорта. Важно подчеркнуть,

что указанные законы носят универсальный характер – они одинаково применимы и к традиционным ракетным технологиям, и к принципиально новым способам вывода грузов с Земли на орбиту.

Ракетные технологии, несмотря на их несомненные успехи в последние десятилетия, демонстрируют ряд ограничений, коренящихся в физической природе реактивного движения. Каждый запуск ракеты-носителя сопровождается, как отмечено выше, выбросом в разрежённых верхних слоях атмосферы продуктов сгорания в виде высокотемпературной и высокоскоростной плазмы общей массой в сотни тонн [32]. Это приводит к значительному воздействию на атмосферу, вызывая образование турбулентных вихрей и временных озоновых дыр площадью, сопоставимой с территорией средней европейской страны. Вместе с тем энергетическая эффективность ракетных систем остаётся низкой: для вывода тонны полезного груза на низкую околоземную орбиту высотой 200 км необходима энергия, эквивалентная примерно 32 300 МДж (8970 кВт · ч) [33].

Кроме того, физические ограничения ракетных технологий проявляются в требованиях к мощности двигательных установок: для вывода полезной нагрузки на орбиту нужна мощность около 1 млн кВт на каждую тонну груза. Такие экстремальные энергетические параметры обусловлены фундаментальными физическими ограничениями реактивного движения и не могут быть значительно улучшены в рамках существующей ракетной парадигмы.

Концепция ОТС предлагает принципиально иной физический подход к решению задачи космической индустриализации, который предусматривает использование центробежных сил, создаваемых вращающейся кольцевой структурой, охватывающей планету по экватору. Расчёты показывают, что при окружной скорости ленточных маховиков системы, равной 10–12 км/с, и относительно небольших ускорениях выхода в космос, около 1–1,5 м/с^2, может быть достигнут эффективный вывод грузов на экваториальную орбиту с первой космической скоростью в течение 2 ч. Важнейшей особенностью данного инженерного проекта является возможность рекуперации энергии при торможении ленточных маховиков, что делает ОТС обратимой геокосмической транспортной системой и в теории позволяет приблизить общий КПД к 100 % (например, при использовании сверхпроводников в системах магнитной подушки и линейном электроприводе).

Экономические параметры ОТС демонстрируют его принципиальное преимущество перед традиционными геокосмическими системами. Расчётная грузоподъёмность составляет около 10 млн тонн за один рейс, при этом стоимость вывода тонны полезного груза на орбиту высотой 400 км будет существенно ниже 1000 USD. Для выполнения аналогичного объёма работ современной ракетной индустрии понадобилось бы около миллиона лет непрерывного функционирования. Энергетические потребности ОТС оцениваются в 100 млн кВт, что менее 2 % от установленной мощности всех электростанций мира и сопоставимо с мощностью одной тяжёлой ракеты-носителя грузоподъёмностью 100 тонн.

Экологический аспект проекта заслуживает особого внимания. В отличие от ракетных технологий, создающих значительные локальные возмущения атмосферы, ОТС, работающее только на электрической энергии, полностью исключает механическое, химическое и энергетическое воздействие на атмосферные слои. Это достигается за счёт реализации принципа прямой передачи импульса земной коре и использования замкнутых энергетических циклов. Таким образом, система не производит химических выбросов в атмосферу и не оказывает теплового влияния на окружающую среду, что важно для обеспечения стабильности озонового слоя.

Технологическая осуществимость проекта подтверждается имеющимися инженерными решениями и современными производственными возможностями. Для воплощения концепции понадобится около 100 млн тонн металла, что сопоставимо с трёхнедельным объёмом мирового производства стали. Потребность в железобетоне оценивается в 10 млн м^3 – примерно столько же было использовано при строительстве плотины Саяно-Шушенской гидроэлектростанции. Финансовая оценка полной реализации проекта составляет 2,5 трлн USD [10], что соизмеримо с суммой трёх годовых военных бюджетов США.

Перенос на экваториальные околоземные орбиты значительной части промышленного производства, вредного для живой биосферы, но безопасного для мёртвого космического пространства, откроет доступ к уникальным технологическим возможностям, недоступным на Земле. Речь идёт прежде всего об использовании факторов невесомости, глубокого вакуума с остаточным давлением около одной миллионной атмосферы, а также экстремальных температурных режимов, создаваемых, например, концентрацией солнечного излучения. Данные условия порождают предпосылки для развития принципиально новых производственных процессов в области материаловедения, фармацевтики, микроэлектроники и других высокотехнологичных отраслей.

Философское значение проекта ОТС распространяется далеко за рамки чисто технического решения транспортной задачи. Реализация этой концепции ознаменует переход от парадигмы технологического противостояния с природными силами, характерной для эпохи индустриализации, к модели гармоничного взаимодействия с физическими законами мироздания.

Предлагаемый проект воплощает в себе принципы устойчивого развития, обуславливающие сохранение и восстановление земной биосферы при одновременном обеспечении неограниченного роста производственных возможностей человеческой технологической цивилизации. Таким образом, ОТС – не просто инженерное сооружение, а концептуально новая философия технологического прогресса, основанная на понимании единства человечества, природы и космоса.

Глубинный анализ концепции ОТС инженера Юницкого требует её рассмотрения через призму исторического развития космических технологий. В отличие от традиционных ракетных систем, берущих начало в военных разработках середины XX в., ОТС представляет собой фундаментально иное мировоззрение космической деятельности, корни которого уходят в русский космизм XIX–XX вв.

Конструкционные параметры ОТС поражают воображение [10]:

- длина кольцевой структуры – 40 076 км (длина экватора). После выхода на орбиту высотой 400 км длина ОТС составит 42 520 км;
- масса конструкции – около 40 млн тонн (сравнимо с 500 Эйфелевыми башнями);
- расчётный срок службы – около 100 лет благодаря отсутствию критических термомеханических нагрузок.

Философское обоснование проекта, данное А.Э. Юницким в работах 1982–2025 гг., заслуживает отдельного рассмотрения. Концепция ОТС – своеобразная материализация принципов русского космизма, где технология выступает не как инструмент подчинения природы, а как средство эволюции человечества и Вселенной. Инженером Юницким неоднократно подчёркивается, что мы создаём не просто транспортную систему, а новый орган коллективного тела цивилизации, позволяющий гармонично существовать в космической среде.

Этот подход радикально отличается от традиционной парадигмы завоевания космоса, предлагая вместо неё модель врастания в космическое пространство. Такая философская позиция находит отклик в современных экзистенциальных концепциях технологического развития, где акцент смещается с покорения природы на поиск устойчивых форм синергизма.

Проведённый анализ показывает, что ОТС в отличие от традиционных ракетных систем реализует принцип космической умеренности, предлагая:

- в 50 раз более эффективное удельное использование ресурсов;
- в 100 раз меньшую удельную энергоёмкость геокосмической логистики;
- в 1000 раз большую пропускную способность геокосмической транспортной системы – самонесущего летательного аппарата;
- в 10 000 раз сниженную себестоимость геокосмической логистики.

Вывод однозначен: концепция ОТС представляет собой, с одной стороны, альтернативный технический проект, а с другой – принципиально новую философию космической деятельности, где технологический прогресс измеряется не мощностью преодоления, а степенью гармонизации с земной и космической средой.

Преимущества БИК: мультипликативный эффект

Глубокий анализ преимуществ БИК требует рассмотрения нескольких взаимосвязанных аспектов: экономического, экологического и социально-философского.

Экономические параметры системы демонстрируют революционные показатели:

- стоимость вывода грузов снижается до значений менее 1000 USD/т (против 3,4 млн USD/т у лучших современных ракет), а при высоких обратных грузопотоках по маршруту «Орбита – Земля» – до 100 USD/т и менее;
- энергоёмкость геокосмической логистики составляет менее 300 кВт · ч на тонну груза (примерно в 100 раз меньше, чем у ракеты);
- пропускная способность достигает 100 запусков в год по 10 млн тонн каждый (аналогично ежегодному запуску 10 млн тяжёлых ракет грузоподъёмностью по 100 тонн, однако такие летательные аппараты ещё не созданы, а их общая стоимость составила бы свыше 5000 трлн USD).

Эти цифры становятся ещё более впечатляющими при их анализе в долгосрочной перспективе. По оценкам экономистов, полная реализация БИК может:

- к 2050 г. сократить глобальные затраты на космическую логистику на 1,2 трлн USD при увеличении в тысячи раз объёма транспортировки грузов в космос и обратно;

• создать более 100 млн новых высокотехнологичных рабочих мест на Земле и орбите;

• обеспечить 1000-кратное увеличение объёмов космических грузоперевозок, необходимых для широкомасштабного (индустриального) освоения космоса.

Экологический эффект БИК заслуживает отдельного рассмотрения. Система полностью исключает:

• выбросы сажи (один запуск Falcon Heavy по этому показателю эквивалентен 11 трансатлантическим рейсам аэробуса);

• образование космического мусора (в настоящее время на орбите находится около 9000 тонн техногенных объектов в виде миллионов обломков разрушенных космических аппаратов);

• химическое, тепловое и электромагнитное загрязнение атмосферы.

Согласно расчётам экологов внедрение БИК позволит:

• сократить углеродный след космической отрасли примерно в 50 раз;

• полностью предотвратить образование новых орбитальных отходов;

• исключить риск синдрома Кесслера – цепной реакции столкновений космических станций на орбите.

Философские основания преимуществ БИК, изложенные инженером Юницким в его работах, представляют особый интерес. Концепция космической аскезы предполагает:

• минимизацию вмешательства в природные системы – земные (биосферные) и космические (орбитальные);

• максимизацию эффективности использования ресурсов;

• принцип технологического альтруизма – выгода для всех (для природы и человечества) вместо прибыли для избранных и убытков для остальных (для природы и человечества).

Политические барьеры внедрения БИК

1. Правовые коллизии:

• статья II Договора по космосу 1967 г. [34] запрещает национальное присвоение небесных тел, что осложняет правовой статус ОТС;

• вопрос юрисдикции: чьи законы будут действовать на орбитальном сооружении, охватывающем Землю по территории многих стран?

2. Геополитические противоречия:

• отраслевое лобби: мировой рынок ракетных запусков оценивается в 12,7 млрд USD [35];

• противодействие космических комплексов: 25–35 % всех спутников имеют военное назначение.

3. Экономические интересы:

• срок окупаемости проекта (10–15 лет) сопоставим с горизонтом планирования большинства государств;

• необходима беспрецедентная международная кооперация (аналог Международной космической станции, но на несколько порядков сложнее).

Э. Садех, доктор политических наук, президент компании Astroconsulting International, специализирующийся на пересечении науки, технологий и государственной политики в области освоения космоса, отмечает, что разработка и освоение космоса – это технические, инженерные и научные изыскания. Однако политические факторы определяют, какие космические программы и проекты будут реализовываться, а также устанавливают параметры стоимости, производительности и сроков для достижения этих целей [36].

Философский смысл БИК:
от технократии к космической этике

Отказ от тупиковых технологий: критика ракетного мышления. Когда мы анализируем ракетную парадигму через призму философии технологии ОТС и программы безракетной индустриализации космоса uSpace [37], становится очевидным экзистенциальный тупик традиционной концепции. Ракеты – это технологический атавизм, восходящий к древнейшим попыткам человека преодолеть гравитацию через грубую силу. Как отмечает А.Э. Юницкий, сжигать тысячи тонн топлива для доставки нескольких тонн груза – это всё равно что пытаться переплыть океан, сжигая за собой плот.

Энергетическая неэффективность (до 93 % массы ракеты – топливо) – не просто технический параметр, а показатель фундаментальной порочности всей концепции. Здесь проявляется старая парадигма «господство через насилие», где природа (в данном случае – гравитация) воспринимается как враг, которого нужно победить ценой огромных энергетических затрат.

Экологический ущерб (400 тонн CO_2 + 11 тонн сажи на запуск + миллионы тонн уничтоженного озона) – прямое следствие антропоцентрического высокомерия. Как рассуждает А.Э. Юницкий, мы ведём себя как варвары, гадящие у порога собственного дома. При этом масштабирование

такой модели для космической индустриализации равносильно экологическому самоубийству.

Экономическая ограниченность (3,4 млн USD/т) – показатель того, что ракетная технология по своей сути элитарна. Она воспроизводит модель «космос для избранных», противоречащую базовым принципам космического гуманизма.

Философия устойчивого технологического развития: новая этика космической деятельности. Переход к БИК требует радикального пересмотра самих оснований нашего технологического мышления. Инженер Юницкий предлагает три фундаментальных принципа [37, 38].

1. Принцип космической достаточности – не просто аналог устойчивого развития, а качественно новая философия. А.Э. Юницкий отмечает, что космос не терпит излишеств. В его бескрайних просторах особенно очевидна абсурдность нашей потребительской модели.

2. Концепция технологического бессмертия (срок службы 100+ лет) – вызов современной культуре запланированного устаревания. Изобретатель задаётся риторическим вопросом: если мост может стоять тысячу лет, почему космическая инфраструктура должна быть одноразовой?

3. Этический императив «не навреди» приобретает в космическом контексте особое звучание. Как утверждает А.Э. Юницкий, мы должны относиться к космосу как врач к пациенту: первое правило – не навредить хрупкому равновесию околоземной космической среды.

Философские основания БИК: онтология космического бытия. Онтологический статус космоса как «дома бытия» (в противовес «ресурсной кладовой») меняет и парадигму освоения. Как поясняет А.Э. Юницкий, мы не колонизируем космос, мы учимся в нём жить, как ребёнок учится жить в родительском доме.

Гносеологическая революция БИК особенно показательна:

- отказ от «метафизики толчка» (ракеты) – отказ от насильственной модели взаимодействия;
- принятие принципа взаимодействия с полями – переход к гармоничной модели сотрудничества с природными силами.

Этическая триада БИК представляет собой системное мировоззрение:

- экологическая ответственность – признание хрупкости геокосмической среды (в планетарном отношении);
- социальная справедливость – космос как общее достояние человечества: «Земля – для жизни. Космос – для индустрии»;
- межпоколенческая этика – ответственность перед потомками в масштабах веков: «Мы не получили Землю в наследство от наших предков, мы взяли её в долг у наших потомков».

Как заключает А.Э. Юницкий, БИК – это не просто транспортная система. Это школа нового космического сознания, где технологический прогресс измеряется не мощностью взрыва, а гармонией взаимодействия. Следовательно, переход к БИК представляется как технической модернизацией, так и настоящей антропологической революцией – рождением нового, космического человечества (таблица).

Таблица – Сравнительная характеристика технологических парадигм

Критерий	Технократическая парадигма	БИК-парадигма
Цель	Максимизация мощности	Оптимизация гармонии
Отношение к природе	Господство	Симбиоз
Временной горизонт	5–10 лет	100+ лет
Этическое основание	Отсутствует	Системообразующее

Таким образом, БИК – первый общецивилизационный проект, где техника не противопоставляется природе, а видится её продолжением. В этом его главная философская ценность. Реализация данной концепции потребует не только технологических прорывов, но и радикального пересмотра наших представлений о месте человечества в космосе. Подобные идеи находят отклик в различных философских традициях:

- буддийском принципе срединного пути;
- западной экологической философии устойчивого развития;
- концепции ответственности за будущее, предложенной немецким и американским философом-экзистенциалистом Х. Йонасом.

Особого внимания заслуживает принцип технологического симбиоза, предполагающий:

- встраивание технических систем в природные циклы;
- использование биологических принципов в инженерных решениях;

• создание замкнутых экосистем биосферного типа и техногенного характера;

• исключение деградации, угасания и гибели технологической человеческой цивилизации в планетарной чашке Петри, где любая популяция живых организмов, исчерпав ресурсы и загрязнив отходами своей жизнедеятельности ограниченное пространство, неизбежно рано или поздно погибает.

Вывод очевиден: преимущества БИК носят как количественный, так и качественный характер, предлагая принципиально новую модель взаимодействия инженерной технологии и природы, где экологическая ответственность и экономическая эффективность не противоречат друг другу, а взаимно усиливаются.

Наука между кризисом и спасением: философско-методологический анализ

Сравнительный анализ технологических парадигм: в поисках ответственной науки

Сегодня цивилизация стоит перед судьбоносным выбором технологического пути космической индустриализации, который определит не только наше будущее в космосе, но и перспективы преодоления глобального системного кризиса на Земле. Этот выбор нельзя сводить к чисто техническим параметрам – он требует глубокого философского осмысления конкурирующих парадигм через призму идеала ответственной науки.

Ракетная техника, даже при впечатляющем развитии за последнее время, несёт в себе фундаментальные противоречия, коренящиеся в философской основе данной технологии. Их генеалогия восходит к эпохе Просвещения с её безграничной верой в прогресс и антропоцентрическим мировоззрением, рассматривающим природу как объект для покорения. Технические характеристики современных ракет – от беспрецедентной энергетической неэффективности до катастрофического экологического ущерба – являются не случайными недостатками, а закономерными следствиями данной мировоззренческой установки. Когда мы видим, что львиная доля массы ракеты – это топливо, сжигаемое для преодоления гравитации, перед нами встаёт вопрос не столько о техническом несовершенстве, сколько о порочности концепции силового противостояния с природными законами.

В таком контексте концепция БИК инженера Юницкого представляет собой качественный скачок в эволюции технологического мышления. Её принципиальное отличие заключается как во впечатляющих технических характеристиках, так и в радикально иной философии взаимодействия с космической средой. Если ракетные технологии основаны на логике конфронтации и насильственного преодоления, то БИК предлагает парадигму сотрудничества с природными силами, в первую очередь с гравитацией, и их разумного использования. Это проявляется во всех аспектах системы:

• применение центробежных сил вращения Земли вместо взрывных химических реакций;

• использование внутренних сил системы для выполнения транспортной работы (принцип барона Мюнхгаузена) вместо опирания на внешнюю среду: у пешехода это земля, у автомобиля – асфальт, у корабля – вода, у поезда – рельсы, у самолёта – воздух, у ракеты – реактивная струя;

• создание постоянно действующей многоразовой геокосмической инфраструктуры вместо одноразовых расходных систем: такой инфраструктурой на Земле станет экваториальный линейный город со взлётно-посадочной эстакадой ОТС, а на орбите – космическое индустриальное ожерелье «Орбита»;

• ориентация на долгосрочную устойчивость и экологическую гармонию вместо краткосрочной эффективности;

• принцип космической достаточности, исключающий ресурсную расточительность.

Таким образом, с позиций идеала ответственной науки, учитывающей долгосрочные последствия, этические аспекты и системное воздействие технологий, БИК представляет собой несомненно более зрелую и перспективную парадигму для всего человечества, а не для избранных. Она предлагает не просто альтернативный способ вывода грузов на орбиту, а воплощает принципиально новый тип отношений между человеческой цивилизацией и космической средой – отношений не противостояния, а сотрудничества в логике «Земля – наш общий дом. Космос – наша общая мастерская и кладовая».

Сценарии будущего: между техноутопическим заблуждением и антиутопическим тупиком

Анализ возможных путей развития космической индустриализации требует выхода за рамки узкотехнических дискуссий и обращения к глубокому философскому осмыслению ценностных оснований каждого сценария. Сегодняшняя ситуация напоминает известную притчу о слепцах

и слоне: разные подходы охватывают отдельные аспекты проблемы, но не способны увидеть её целиком.

Техноутопический сценарий, базирующийся на традиционных ракетных технологиях, несёт в себе все признаки кризиса современного технократического мышления. Слепая вера в космическую экспансию, которая автоматически решит земные проблемы, является прямым продолжением той самой линейной логики прогресса, приведшей нас к нынешнему системному кризису. Особую озабоченность вызывает то, что этот сценарий:

- механически воспроизводит модель безудержного ресурсного потребления, перенося её в космическое пространство;
- сохраняет элитарный характер доступа к космическим технологиям, где более 80 % коммерческих запусков контролируется тремя корпорациями;
- игнорирует горькие уроки экологических кризисов Земли, предлагая решение через бегство от проблем, а не их преодоление.

Антиутопическая критика космической экспансии, при всей её обоснованности, часто оказывается в плену тех же ложных дихотомий, что и техноутопия. Отрицая возможность позитивного технологического развития, она оставляет человечество без конструктивной альтернативы, обрекая на застой.

Концепция БИК предлагает путь преодоления этого тупикового противостояния через:

- принцип космической умеренности – развитие без избыточности, использование без истощения;
- модель подлинно равноправного доступа к космическим ресурсам, исключающую новые формы колониализма;
- экологическую ответственность как основу технологического развития, а не как случайное последствие.

Этот подход позволяет избежать и слепой веры в технологическое спасение, и антитехнологического пессимизма, предлагая третий путь – ответственного, взвешенного развития.

Условия успеха: к новой космической рациональности

Реализация потенциала БИК требует создания комплексной системы условий, охватывающих все уровни – от технологического и институционального до ценностного и мировоззренческого. С одной стороны, это техническая модернизация, а с другой – подлинная цивилизационная трансформация.

Международное сотрудничество в данной сфере не может ограничиваться традиционными форматами и риторикой. В современной ситуации, когда доступ к космическим технологиям остаётся привилегией узкой группы стран и корпораций, воспроизводятся модели неравенства и несправедливости, характерные для земных социальных систем. Для преодоления такого порочного круга необходимо:

- создание новых институтов глобального управления космической деятельностью, выходящих за рамки национальных интересов;
- разработка прозрачных механизмов передачи технологий развивающимся странам;
- внедрение систем научно-коллективного принятия решений по ключевым вопросам космической индустриализации.

Этическое регулирование космической деятельности должно выйти за рамки формальных кодексов и деклараций, став органичной частью технологического развития человечества. Это требует:

- развития комплексной системы космической этики, учитывающей нужды всех заинтересованных сторон – от современных государств до будущих поколений;
- создания эффективных механизмов оценки долгосрочных последствий технологических решений;
- формирования культуры ответственности в научно-техническом сообществе, где этические вопросы воспринимаются наравне с техническими.

Пересмотр целей прогресса предполагает радикальную трансформацию наших представлений о развитии:

- отказ от абсолютизации экономических показателей в пользу комплексных критериев устойчивости;
- интеграцию экологических и социальных аспектов в сердцевину технологического развития;
- формирование долгосрочной перспективы планирования, учитывающей интересы будущих поколений.

Особое значение имеет становление новой космической рациональности, которая:

- сочетает научную строгость с экзистенциальной глубиной, технический расчёт с философской рефлексией;
- интегрирует различные формы знания – от точных наук до философии и искусства;
- балансирует между инновационностью и преемственностью, между смелостью и ответственностью.

Реализация данных условий позволит осуществить переход к подлинно устойчивой модели космической индустриализации, где технологический прогресс служит не узким корпоративным или национальным интересам, а будущему всего человечества и сохранению геокосмической среды, в первую очередь её живой части – земной биосферы. Как отмечает А.Э. Юницкий, этот переход требует не столько технических прорывов (хотя и они важны), сколько радикального изменения мышления – от *Homo faber*, бездумно преобразующего мир, к *Homo cosmicus*, осознающему свою ответственность перед Вселенной.

Заключение

Синтез теоретического анализа и практических перспектив космической индустриализации

Проведённое исследование позволяет сделать ряд принципиальных выводов, имеющих как теоретическое, так и практическое значение для развития космической деятельности. Анализ сегодняшних тенденций и альтернативных подходов к освоению космического пространства выявляет глубокую диалектику научно-технического прогресса, который одновременно выступает и источником цивилизационных кризисов, и потенциальным инструментом их преодоления.

Основные теоретические положения. Концепция БИК – программа uSpace, разработанная инженером Юницким, – представляет собой достойную альтернативу устоявшимся подходам к освоению космического пространства. В отличие от доминирующей технократической парадигмы, БИК предлагает совершенно иную модель взаимодействия между инженерной технологией и природой, базирующуюся на принципах коэволюции и устойчивого развития. Философский анализ подтверждает, что данная концепция наследует лучшие традиции русского космизма, интегрируя их с современными экологическими императивами.

Практические аспекты реализации. Практическая реализация БИК сталкивается с рядом существенных вызовов. Как показывает исследование, основные препятствия носят не столько технологический, сколько социально-политический характер. Доминирование неолиберальной экономической модели, фрагментарность международного сотрудничества и инерция сложившихся технологических траекторий создают серьёзные барьеры для внедрения альтернативных методов. Особое значение приобретает вопрос о формировании новых институциональных механизмов, способных обеспечить переход к устойчивой модели космической деятельности.

Междисциплинарные перспективы. Перспективы развития космической индустриализации требуют комплексного междисциплинарного подхода, интегрирующего:

- философскую рефлексию о природе и границах технологического прогресса;
- экологические принципы устойчивого развития;
- инновационные технологические решения.

Данный синтез предполагает как механическое соединение различных дисциплинарных перспектив, так и выработку нового методологического подхода, который позволяет преодолеть традиционный разрыв между гуманитарным и естественно-научным знанием.

Антропологическое измерение. Важно подчеркнуть, что выбор между различными моделями космической индустриализации имеет глубокое антропологическое значение. Он определяет не только технические параметры освоения космоса, но и образ человека будущего, характер социальных отношений и траекторию цивилизационного развития. В этом контексте концепция БИК предлагает альтернативную антропологическую перспективу, ориентированную на становление *Homo cosmicus* – человека, способного к гармоничному существованию в космическом пространстве.

Перспективы дальнейших исследований

Последующая разработка темы требует углублённого анализа теоретических и практических аспектов проблемы. Особое значение приобретают:

- исследование исторических альтернатив в развитии космических технологий;
- анализ социокультурных барьеров для инноваций;
- разработка комплексных моделей оценки технологий;
- создание механизмов международного сотрудничества.

Заключительные положения

Переход к ответственной космической индустриализации представляет собой комплексную проблему, требующую технологических инноваций, а также глубокой трансформации системы ценностей, моделей мышления и социальных институтов. Решение этой задачи предполагает выработку новой философии космической деятельности, которая обеспечит интеграцию научно-технического прогресса с экологической ответственностью и социальной справедливостью.

Список основных источников

1. *Колчинский, Э.И. Наука, власть и общество в периоды кризисов: историко-сравнительный анализ / Э.И. Колчинский // Эпистемология & Философия науки. – 2008. – Т. 15, № 1. – С. 132–148.*
2. *Назаретян, А.П. Цивилизационные кризисы в контексте Универсальной истории (Синергетика – психология – прогнозирование): пособие для вузов / А.П. Назаретян. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Мир, 2004. – 368 с.*
3. *Колчинский, Э.И. Наука и кризисы в XX веке: некоторые результаты сравнительного анализа / Э.И. Колчинский // Экономический вестник Ростовского государственного университета. – 2008. – Т. 6, № 3. – С. 141–149.*
4. *Social Scientists Confronting Global Crises / ed. J.M. Bartunek. – London: Routledge, 2022. – 160 p.*
5. *Манушин, Д.В. Истинные причины мировых экономических кризисов и их воздействие на российскую экономику / Д.В. Манушин // Финансы и кредит. – 2014. – № 42 (618). – С. 52–70.*
6. *Paglia, E. The Socio-Scientific Construction of Global Climate Crisis / E. Paglia // Geopolitics. – 2018. – Vol. 23, iss. 1. – P. 96–123.*
7. *Кожаткина, Е.В. Роль науки в преодолении современных глобальных кризисов / Е.В. Кожаткина // Путеводитель предпринимателя. – 2021. – Т. 14, № 4. – С. 119–125.*
8. *Останина, Н.Г. Воздействие ракетно-космической техники на озоновый слой / Н.Г. Останина // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2012. – Т. 1, № 8. – С. 227–228.*
9. *Вершинин, А.А. Современное состояние и перспективы развития ракетно-космической отрасли России / А.А. Вершинин // Перспективы социально-экономического развития приграничных регионов: материалы VI междунар. науч.-практ. конф., Петрозаводск, 26–28 сент. 2019 г. / Карел. науч. центр РАН, Ин-т экономики КарНЦ РАН; отв. ред. Т.В. Морозова, Н.Г. Колесников. – Петрозаводск, 2019. – С. 74.*
10. *Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе. – Силакрогс: ПНБ принт, 2019. – 576 с.*
11. *Воронцова, В.В. Космический лифт / В.В. Воронцова // Гагаринские чтения – 2019: XLV междунар. молодёж. науч. конф., Москва, 16–19 апр. 2019 г.: сб. тез. докл. – М., 2019. – С. 581–582.*
12. *Турко, Д.С. Разум и господство в «Диалектике Просвещения» М. Хоркхаймера и Т. Адорно / Д.С. Турко // Ломоносов-2019: XXVI междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Москва, 8–12 апр. 2019 г. – URL: https://conf.msu.ru/archive/Lomonosov_2019/data/15716/97124_uid206032_report.pdf (дата обращения: 12.07.2025).*
13. *Keeping the Promise – Annual Report 2023 // UNEP. – URL: https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/44777 (date of access: 12.07.2025).*
14. *Living Planet Report 2022. Building a Nature-Positive Society // WWF. – URL: https://www.wwf.org.uk/sites/default/files/2023-05/WWF-Living-Planet-Report-2022.pdf (date of access: 12.07.2025).*
15. *Ежегодник SIPRI 2023: Вооружения, разоружение и международная безопасность // Sipri. – URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/2023-12/yb23_summary_ru_0.pdf (дата обращения: 12.07.2025).*
16. *Kemp, S. Digital 2023: Global Overview Report / S. Kemp // Datareportal. – URL: https://datareportal.com/reports/digital-2023-global-overview-report. – Publ. date: 26.01.2023.*
17. *Top 10 Key Average Human Attention Span Statistics & Facts // Conifer Park. – URL: https://www.coniferpark.com/blog/average-human-attention-span-statistics (date of access: 12.07.2025).*
18. *Rotman, D. Technology and Inequality / D. Rotman // MIT Technology Review. – URL: https://www.technologyreview.com/2014/10/21/170679/technology-and-inequality/. – Publ. date: 21.10.2014.*
19. *ESA's Annual Space Environment Report // ESA. – URL: https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf (date of access: 12.07.2025).*
20. *SpaceX Reusable Launch System Development Program // Wikipedia. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceX_reusable_launch_system_development_program (date of access: 12.07.2025).*
21. *Экспериментальные исследования стендового образца ракетного двигателя с непрерывно-детонационным горением смеси природного газа с кислородом / В.С. Иванов, В.С. Аксёнов, С.М. Фролов, И.О. Шамшин // Горение и взрыв. – 2016. – Т. 9, № 2. – С. 51–64.*
22. *Экологические проблемы эксплуатации ракетно-космических систем / В.В. Родченко, А.Г. Галеев, П.В. Пичужкин [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – № 7 (171). – С. 93–107.*
23. *Яник, А.А. К концепции «космической экономики» / А.А. Яник // Тренды и управление. – 2018. – № 1. – С. 51–66.*

24. *Багрий, А.А. Илон Маск: проект возможной колонизации Марса / А.А. Багрий // Через тернии к звёздам: освоение космоса: сб. материалов науч. конф., посвящ. памяти лётчика-космонавта А.А. Леонова, Кемерово, 11–13 апр. 2002 г. / Кемер. гос. мед. ун-т [и др.]; отв. ред.: Т.В. Пьянзова [и др.]. – Кемерово, 2022. – С. 108–112.*
25. *Chan, S.-W. Journey to Mars and Cosmic Radiation / S. W. Chan // Hong Kong Observatory. – URL: https://www.hko.gov.hk/en/education/space-weather/effects-of-space-weather/00703-Journey-to-Mars-and-Cosmic-Radiation.html. – Publ. date: 27.07.2023.*
26. *Biobehavioral and Psychosocial Stress Changes During Three 8–12 Month Spaceflight Analog Missions with Mars-Like Conditions of Isolation and Confinement / J.D. Rosenberg, A. Jannasch, K. Binsted, K. Binsted // Frontiers in Physiology. – 2022. – Vol. 13. – 898841.*
27. *Ahuja, A. "Over $1000 Trillion": Elon Musk Breaks Down Cost of Building Multiplanetary Life on Mars / A. Ahuja // NDTV World. – URL: https://www.ndtv.com/world-news/over-1000-trillion-elon-musk-breaks-down-cost-of-building-multiplanetary-life-on-mars-6793120. – Publ. date: 15.10.2024.*
28. *UCS Satellite Database // Union of Concerned Scientists. – URL: https://www.ucs.org/resources/satellite-database. – Publ. date: 01.05.2023.*
29. *Михайлова, Д.В. Экологические аспекты освоения космоса / Д.В. Михайлова, В.А. Козловская // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2011. – Т. 2, № 7. – С. 385–386.*
30. *Багров, А.В. От К.Э. Циолковского к современным представлениям о космических поселениях / А.В. Багров // К.Э. Циолковский. Проблемы и будущее российской науки и техники: материалы 52-х науч. чтений памяти К.Э. Циолковского, Калуга, 19–21 сент. 2017 г. / М-во культуры Рос. Федерации [и др.]. – Калуга, 2017. – С. 119–122.*
31. *Clarke, A.C. The Challenge of the Spaceship / A.C. Clarke. – New York: Harper, 1959. – 212 p.*
32. *Костров, Л.С. Доплеровское радиозондирование возмущений в E- и F-областях ионосферы при стартах и полётах космических аппаратов / Л.С. Костров, В.Т. Розуменко, Л.Ф. Черногор // Космическая наука и технология. – 2002. – Т. 8, прил. 2 (12). – С. 132–143.*
33. *Лобановский, Ю.И. Цена космоса: сколько стоит выход на орбиту? / Ю.И. Лобановский // Synerjetics Group. – URL: http://www.synerjetics.ru/article/cost.htm (дата обращения: 12.07.2025).*
34. *Вылегжанин, А.Н. Состязательное соблюдение Россией и США Договора по космосу 1967 г. / А.Н. Вылегжанин, О.А. Киселева, И.Ю. Штодина // Правоприменение. – 2023. – Т. 7, № 3. – С. 145–154.*
35. *Space Launch Services Market (2023–2033) // Allied Market Research. – URL: https://www.alliedmarketresearch.com/space-launch-services-market (date of access: 12.07.2025).*
36. *The Politics of Space: A Survey / ed. E. Sadeh // Routledge. – URL: https://www.routledge.com/The-Politics-of-Space-A-Survey/Sadeh/p/book/9781857437584 (date of access: 12.07.2025).*
37. *Юницкий, А.Э. Инженер Мира: автобиография / Анатолий Юницкий. – Минск: СтройМедиаПроект, 2023. – 500 с.: ил.*
38. *Юницкий, А.Э. Инженерия. Мир как инженерный проект / А.Э. Юницкий // Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск, 2024. – С. 22–135.*

УДК 629.7

Индустриализация и освоение ближнего космоса: рывок в будущее продолжительностью в десятилетие

И.А. Паценко

ЗАО «Струнные технологии»,
г. Минск, Беларусь

Цель работы – предоставить краткий анализ достижений и перспектив индустриализации ближнего космоса в 2015–2025 гг. с учётом влияния геокосмической программы uSpace на формирование новой парадигмы освоения околоземного пространства.

Особое внимание уделено прогрессу в создании многоразовых ракет-носителей, наращиванию спутниковых группировок, достижениям в области космического производства и биопечати, перспективам колонизации Луны и Марса, вкладу частных компаний в развитие этой сферы, а также потенциалу безракетной индустриализации ближнего космоса. Рассмотрены основные технологические и экономические вызовы, стоящие перед дальнейшим освоением околоземного пространства. Проанализирован десятилетний период, в течение которого велась активная деятельность в данном направлении, включая разработку технологий добычи внеземных ресурсов и строительства орбитальных производственных мощностей. Внедрение таких инноваций способно привести к экспоненциальному росту ВВП и созданию перспективных отраслей экономики.

Подчёркнуто, что успешная реализация концепции индустриализации космоса требует скоординированных усилий государства, бизнеса и научного сообщества и может стать ключом к устойчивому развитию человечества в XXI в.

Ключевые слова:
безракетная индустриализация космоса, биопечать, колонизация Луны, колонизация Марса, космическое производство, многоразовые ракеты-носители, общепланетарное транспортное средство (ОТС), программа «ЭкоМир», программа uSpace, спутниковые группировки, частные космические компании.

UDC 629.7

Industrialization and Exploration of Near Space: A Ten-Year Step into the Future

I. Patsenka

Unitsky String Technologies Inc.,
Minsk, Belarus

The aim of this work is to provide a brief analysis of the achievements and prospects of near space industrialization during the period from 2015 to 2025, taking into account the influence of the uSpace geocosmic program on the formation of a new paradigm for space exploration.

The study considers progress in the development of reusable launch vehicles, the expansion of satellite constellations, advances in space manufacturing and bioprinting, prospects for the colonization of the Moon and Mars, the potential of non-rocket near space industrialization. Particular attention is paid to the role of private companies in the development of the space industry, as well as to the analysis of the key technological and economic challenges hindering further space exploration. The paper examines a ten-year period of active preparation for it, including initiatives related to the extraction of extraterrestrial resources and the construction of orbital production facilities – processes capable of driving exponential GDP growth and giving rise to perspective economic sectors.

It is emphasized that the successful implementation of the space industrialization concept requires coordinated efforts by the state, business, and the scientific community, and may become a cornerstone of sustainable human development in the 21st century.

Keywords:
bioprinting,
colonization of Mars,
colonization of the Moon,
EcoSpace program,
General Planetary Vehicle (GPV),
non-rocket space industrialization,
private space companies,
reusable launch vehicles,
satellite constellations,
space manufacturing,
uSpace program.

Введение

Человечество всегда стремилось за пределы известного. История цивилизации – от первых робких шагов в авиации до прорыва в космос – это история преодоления границ. Идея индустриализации космоса, освоения ресурсов и создания внеземных производственных мощностей стала логичным продолжением данной тенденции. Первые концепции, появившиеся в трудах К. Циолковского и Р. Эно, обрели научную основу в работах Д. О'Нилла, представившего детальные проекты космических колоний и использования лунного сырья. Необходимость решения глобальных проблем (исчерпание ресурсов, перенаселение и др.) лишь усилила интерес к этой амбициозной задаче.

За последнее десятилетие (2015–2025 гг.) космическая индустрия пережила период бурного роста и трансформации. Ускорение темпов изучения и освоения космоса оказалось возможным благодаря нескольким факторам: появлению новых технологий и программного обеспечения, политическому соперничеству между державами, стремлению к расширению знаний о Вселенной и увеличению частных инвестиций в космические проекты. В результате наблюдается прогресс в таких направлениях, как разработка многоразовых ракет-носителей, создание масштабных спутниковых группировок, развитие космического производства, а также подготовка к пилотируемым миссиям на Луну и Марс [1].

Особое внимание уделяется устройству станций для производства топлива и материалов непосредственно в космосе. Появляются новые концепции космических лифтов и орбитальных заводов. В будущем ожидается расширение орбитальной инфраструктуры, рост космического туризма и начало добычи внеземных ресурсов. Важную роль в этом сыграют государственные и частные инвестиции, а также международное сотрудничество. Успешная индустриализация околоземного пространства станет ключом к устойчивому развитию человечества и освоению дальнего космоса.

В дополнение к традиционным подходам большое значение имеет вклад концепций А.Э. Юницкого, акцентирующего внимание на безракетной индустриализации космоса и переносе промышленности с планеты в околоземное пространство [2]. Внедрение безракетных технологий вывода грузов на орбиту, как описано в научном издании «Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты» [3], открывает новые перспективы.

Космическое производство: будущее создаётся сегодня

Космическое производство является относительно новым, однако перспективным направлением развития космической индустрии и предполагает изготовление продукции в условиях микрогравитации и вакуума, которые позволяют создавать материалы и изделия с уникальными свойствами. Добыча ресурсов в космосе (вода, металлы, редкоземельные элементы и др.) может стать значимым источником сырья для дальнейшего освоения околоземного пространства и роста космической экономики.

Исследовательскую деятельность в области космического производства ведёт ряд компаний:

- «Роскосмос» – государственная корпорация, отвечающая за реализацию российской космической программы;
- Европейское космическое агентство (ESA) – организация, координирующая космическую деятельность в Европе. Активно развивает программы, связанные с 3D-печатью на орбите. Важное направление – получение материалов, которые будут использованы в космическом производстве. В 2019 г. ESA приступило к изучению новых композитов, подходящих для создания спутников и других космических аппаратов. Кроме того, рассматриваются материалы, которые могут быть получены путём обработки местных ресурсов на Луне и Марсе. Это предполагает применение лунного грунта (реголита) и других минералов, что позволит снизить необходимость в ресурсах, доставляемых с Земли;
- Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA) – государственная структура, отвечающая за космическую программу страны [4]. Одним из направлений деятельности JAXA в последнее десятилетие стало изучение возможности использования реголита для производства строительных материалов и топлива. Были проведены эксперименты по извлечению кислорода из лунного грунта с помощью различных методов, в том числе нагрева и электролиза. Агентством разработаны специальные системы для культивирования растений в условиях микрогравитации и ограниченного пространства;
- Space Tango – американская компания, специализирующаяся на проведении экспериментов при микрогравитации, а также на создании технологий для космического производства. Основные достижения Space Tango: осуществление на Международной космической станции (МКС) научных экспериментов в области биологии, материаловедения и фармацевтики; организация платформы для космического производства, позволяющей выращивать кристаллы белков и другие материалы в условиях микрогравитации; участие

в проектах по изучению влияния космической среды на биологические системы; развитие технологий для будущих космических миссий – лунных, марсианских и др.;

• Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) – агентство США, занимающееся космическими разработками. Одним из приоритетных направлений является применение аддитивных технологий, или 3D-печати, в условиях микрогравитации. Параллельно NASA активно изучает возможность использования лунных и марсианских ресурсов. Развитие технологий роботизированной сборки в космосе также стало важной частью деятельности агентства. Программа On-Orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing (OSAM) демонстрирует потенциал сооружения непосредственно на орбите крупных космических конструкций (антенны, солнечные панели и др.), что открывает новые горизонты для космической инфраструктуры [5];

• ООО «Астроинженерные технологии» – белорусская инновационная компания, предлагающая передовые научные и технологические решения для реализации масштабного проекта по строительству уникальной геокосмической транспортной системы на основе экологически чистых технологий в рамках глобальной программы uSpace, направленной на безракетное освоение околоземного пространства для спасения жизни на планете. В частности, компания работает над созданием общепланетарного транспортного средства (ОТС), взлётно-посадочной эстакады ОТС, экологически чистых жилых поселений и производственных кластеров в ближнем космосе [6];

• Redwire Space – американская корпорация, специализирующаяся на космической инфраструктуре и технологиях: проводит исследования в условиях микрогравитации, разрабатывает развёртываемые конструкции и обеспечивает выполнение космических полётов с полезной нагрузкой. Кроме того, Redwire готовит проекты и документацию для осуществления космических миссий. Компания имеет производственные и испытательные площадки, а также офисные помещения в г. Джексонвилле (штат Флорида, США) [7].

В 2014 г. произошло знаменательное событие в истории освоения космоса: стартап Made In Space (MIS) и NASA начали беспрецедентное партнёрство. Успешное внедрение технологии 3D-печати в рамках эксперимента Zero-G позволило получить первый предмет непосредственно в космическом пространстве. Обеспечив возможность производства объектов за пределами Земли, это открыло новые перспективы для передовых разработок и заложило фундамент для дальнейшего развития космической индустрии [8].

В 2016 г. MIS запущен проект Archinaut (позже известный как OSAM 2) – инициатива, направленная на создание технологии автоматизированного производства и сборки крупногабаритных конструкций в космосе (рисунок 1). Главная идея заключается в том, чтобы преодолеть ограничения, связанные с размерами и массой объектов, запускаемых с Земли. Archinaut позволит непосредственно на орбите производить необходимые компоненты – солнечные панели, антенны и даже элементы космических станций.

Рисунок 1 – Три этапа сборки спутниковой платформы комплексом Archinaut [9]

Основной элемент технологии – специализированный 3D-принтер, адаптированный для работы в условиях вакуума и микрогравитации. Для изготовления различных деталей он использует специальные полимеры, устойчивые к воздействию космической среды. После печати отдельные компоненты собираются роботизированной рукой, также произведённой MIS.

Специалисты возлагали большие надежды на программу Archinaut. Во-первых, данная технология предоставляла возможность снизить стоимость и время развёртывания крупных космических объектов. Во-вторых, она позволяла создавать конструкции, которые нельзя запустить с Земли из-за их размеров. В-третьих, Archinaut предполагалось применять непосредственно на орбите для ремонта и модернизации существующих спутников и станций, продлевая срок их службы и снижая зависимость от наземных операций.

В течение июня 2017 г. MIS в Лаборатории инженерной оценки Исследовательского центра Эймса (NASA) проводила тестирование термовакуумной камеры. В результате произведены первые в истории протяжённые 3D-печатные

объекты в среде, подобной космической. В том же году MIS установила рекорд Гиннесса, изготовив балочную конструкцию длиной более 37 м – самую большую 3D-печатную конструкцию в мире [10].

В 2020 г. Redwire Space (компания, которая в 2020 г. приобрела MIS) напечатала семиметровый летательный аппарат в условиях, аналогичных ожидаемым на орбите.

В 2022 г. прошёл критический обзор программы Archinaut, обозначивший окончание этапа проектирования и начало строительства космического корабля. В 2023 г. NASA завершило проект. Его данные сохранены для использования в будущем [9].

Несмотря на закрытие программы, первые успешные испытания в космосе уже продемонстрировали жизнеспособность разработанной технологии. В будущем Archinaut может стать ключевым фактором в освоении дальнего космоса, а также фундаментом для создания крупных космических инфраструктур и реализации амбициозных научных проектов.

В январе 2024 г. ESA вместе с Airbus удалось доставить на МКС 3D-принтер, позволяющий непосредственно на орбите в режиме реального времени производить прочные и долговечные металлические детали, необходимые для ремонта и обслуживания космических кораблей и станций, что значительно упрощает и удешевляет многие операции [11].

Биопечать за пределами Земли: инновации космической эры

Биопечать (также известна как аддитивное производство, или 3D-биопринтинг) – технология, основанная на применении клеток и биоматериалов для создания биологических структур, в том числе имитирующих человеческие ткани и органы. Процесс включает в себя нанесение клеток на специальные биосовместимые материалы, что позволяет формировать сложные микро- и макроструктуры. В космосе данная методика приобретает особую значимость из-за уникальных условий (например, микрогравитации), которые могут влиять на процесс печати и дальнейшую жизнеспособность клеток.

Технология зародилась в 2010 г., когда учёные начали активно использовать 3D-биопринтеры для печати биологических материалов на МКС. В 2016 г. компания Techshot (позже её подразделение по космическим разработкам приобретено Redwire Space) совместно с NASA и nScrypt приступила к созданию специализированного 3D-биопринтера для функционирования в условиях микрогравитации – BioFabrication Facility (BFF) [12]. BFF применяет биочернила, обычно гидрогели с клетками, для послойного наращивания 3D-структур, что позволяет печатать ткани и человеческие органы. Цель проекта – доказать возможность получения трёхмерных биологических структур и сложных человеческих тканей на орбите. Особенность технологии заключается в том, что при земной гравитации многослойные структуры, напечатанные биопринтерами, часто разрушаются под собственным весом, а в космосе эта проблема отсутствует.

В 2017 г. компания 3D Bioprinting Solutions из инновационного центра «Сколково» начала разработку и производство космического биопринтера, использующего технологию магнитной левитации. В 2018 г. пилотируемый корабль «Союз МС-11» доставил на МКС российский биопринтер «Орган.Авт» [13].

«Орган.Авт» (рисунок 2), в отличие от традиционных 3D-биопринтеров, формирует структуры не послойно, а методом магнитной сборки, используя магнитные поля для укладки клеток. В качестве чернил устройство применяет сфероиды (шарообразные скопления клеток) диаметром около 200 мкм, которые затем выстраиваются в нужную структуру. С помощью магнитного биопринтера на борту МКС успешно напечатана щитовидная железа мыши.

Рисунок 2 – 3D-биопринтер «Орган.Авт» [14]

В 2019 г. грузовым космическим кораблём Cygnus на МКС доставлен 3D-биопринтер BFF (рисунок 3). В 2020 г. американская исследовательская компания Techshot на данном устройстве провела свой первый эксперимент по 3D-печати человеческих тканей в условиях невесомости.

Рисунок 3 – 3D-биопринтер BFF [13]

В апреле 2024 г. российские исследователи из Университета науки и технологий МИСИС сообщили о том, что на биопринтере «Орган.Авт» впервые в мире удалось создать полые органы в космосе. Работу под названием «Магнитная биофабрикация» выполнили на борту МКС первая белорусская женщина-космонавт М.В. Василевская и российский космонавт О.Д. Кононенко [14].

Таким образом, стартовавшие в 2010 г. исследования в области аддитивного производства, которые проводились в невесомости, подтвердили функциональность 3D-печати, в частности неорганическими материалами и полимерами. Биопечать в условиях микрогравитации открывает перспективы для получения продуктов питания и фармацевтических препаратов непосредственно на орбите. Подобная автономность позволит будущим космическим миссиям существенно сократить объём и стоимость транспортируемых материалов, а также обеспечит поддержание здоровья и безопасности членов экипажа. Интеграция технологий биопечати предоставит возможность на борту космического аппарата создавать почти любой необходимый объект, начиная от инструментов и заканчивая биомедицинскими имплантатами.

Многоразовые ракеты и новый взгляд на космические запуски

Один из важнейших факторов, стимулирующих индустриализацию космоса, – уменьшение стоимости доступа в околоземное пространство. Исторически высокая цена запуска космических аппаратов являлась серьёзным препятствием для развития отрасли. Однако благодаря внедрению многоразовых ракет-носителей расходы на вывод грузов на орбиту существенно снизились.

Компания SpaceX, основанная И. Маском, сыграла ключевую роль в революции ракет, разработав Falcon 9 (рисунок 4) [15] – первую в мире частично многоразовую ракету-носитель, способную возвращать первую ступень на Землю для повторного использования. Это позволило значительно уменьшить стоимость запусков и увеличить их частоту [16].

Рисунок 4 – Ракета Falcon 9 [15]

С космодрома на мысе Канаверал во Флориде 16 ноября 2020 г. ракета-носитель Falcon 9 отправилась с американским пилотируемым космическим кораблём Crew Dragon компании SpaceX, который доставил четырёх астронавтов на МКС [17].

Стартовав 8 апреля 2022 г. с космического центра Джона Кеннеди, ракета Falcon 9 осуществила успешный запуск к МКС корабля Crew Dragon с первым полностью частным экипажем в рамках миссии Axiom 1 (AX-1) [18]. Астронавты провели на станции более 15 суток, выполняя научные эксперименты, в том числе в области медицины, и вернулись на Землю 25 апреля.

Миссии Axiom – это серия частных пилотируемых космических полётов на МКС, организуемых компанией Axiom Space совместно с SpaceX и NASA. Axiom нацелены на проведение научных исследований, демонстрацию технологий в условиях микрогравитации, а также на просветительскую деятельность; дают возможность странам, не имеющим собственного космического агентства, отправлять своих представителей на МКС, что расширяет географию астронавтики и способствует международному сотрудничеству. К июлю 2025 г. завершены три миссии и стартовала четвёртая (25 июня 2025 г.) [19].

Многоразовые ракеты-носители создаёт не только SpaceX. Blue Origin, основанная Д. Безосом, разрабатывает ракету New Glenn, которая также предназначена для неоднократного применения. Компания успешно провела несколько пилотируемых суборбитальных полётов на корабле New Shepard, а в январе 2025 г. совершила первый орбитальный запуск ракеты New Glenn, что ознаменовало выход Blue Origin на орбитальный рынок. Сейчас компания активно развивает лунные технологии и производит мощные жидкостные ракетные двигатели BE-4, которые планируется использовать в ракете New Glenn и, вероятно, в других космических аппаратах.

В Китайской Народной Республике также конструируются многоразовые ракеты, в том числе частными организациями. Одна из подобных компаний, Space Epoch (Sepoch), 28 мая 2025 г. успешно испытала ракету «Юаньсинчжэ-1» (YXZ-1). Полёт, стартовавший с морского космодрома у берегов восточной провинции Шаньдун, продолжался 125 с. Ракета достигла высоты 2,5 км, затем вертикально приводнилась (рисунок 5) в Жёлтом море [20].

На сегодняшний день, пока методы безракетного освоения околоземного пространства находятся на стадии становления [3], разработка многоразовых ракет-носителей является одним из приоритетных направлений развития космической индустрии, поскольку позволяет существенно снизить стоимость выхода в космос и сделать полёты более доступными для широкого круга пользователей.

Развитие спутниковых технологий и глобальной связи

В последнее время наблюдается быстрый рост числа спутников на орбите Земли. Это происходит в основном благодаря развитию спутниковых группировок – сети искусственных спутников, действующих совместно, как единая система, для обеспечения глобального покрытия и предоставления различных услуг (широкополосный интернет, связь, наблюдение за планетой, навигация и др.).

Система Starlink, разработанная SpaceX, является примером такой группировки. Цель проекта – открыть планетарный доступ к высокоскоростному интернету. Спутники Starlink функционируют на низкой околоземной орбите, что обуславливает меньшую задержку передачи данных по сравнению с традиционными спутниками. На июнь 2025 г., согласно разным источникам, на орбите Земли находилось от 6200 до 7600 объектов Starlink (рисунок 6).

Помимо Starlink разрабатываются и другие спутниковые группировки. OneWeb, Telesat и Amazon Kuiper – лишь некоторые из проектов, направленных на обеспечение глобального доступа к интернету через спутники.

Рисунок 5 – Приводнение ракеты YXZ-1, 28 мая 2025 г. [20]

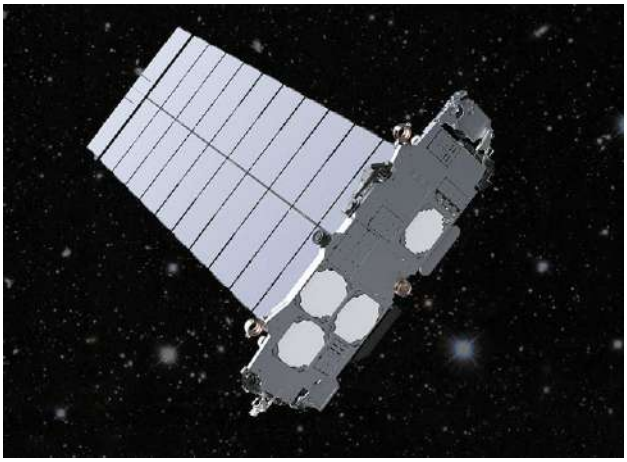


Рисунок 6 – Спутник Starlink версии 2.0 [21]

Несколько группировок активно продвигает Китай. Среди них «Бэйдоу» (навигация), «Тяньтонг» (спутниковая связь) и «Тысяча парусов» (интернет с орбиты). Это делает страну весомым игроком на мировой космической арене, способствуя совершенствованию космических технологий и услуг.

На постсоветском пространстве Россия имеет наиболее развитую спутниковую группировку – Глобальную навигационную спутниковую систему (ГЛОНАСС), спутники дистанционного зондирования и научные миссии.

По заказу НАН Беларуси 22 июля 2012 г. с космодрома Байконур запущен спутник БелКА (Беларускі касмічны апарат) [22]. Он входит в состав группировки, используемой в проектах Союзного государства, и предназначен для получения изображений Земли и мониторинга различных объектов.

Важный аспект прогресса спутниковых технологий – возможность существенно упростить и ускорить освоение обратной стороны Луны, в частности за счёт стабильной связи и навигации, а также мониторинга ресурсов. Спутники, размещённые на лунной орбите, смогут передавать данные на Землю и между лунными базами, обеспечивать высокоточное позиционирование для роботов и будущих лунных поселенцев.

Китайский лунный спутник-ретранслятор «Цюэцяо» является примером этой технологии. Он поддерживает связь между китайской миссией «Чанъэ» на обратной стороне Луны и Землёй. На спутнике также находится Нидерландский низкочастотный экспериментальный радиотелескоп (NCLE) – научный инструмент (разработан Нидерландским институтом радиоастрономии ASTRON), который должен зафиксировать низкочастотное радиоизлучение, генерируемое во время появления первых звёзд и первых галактик через несколько сотен миллионов лет после Большого взрыва. Проведение данного эксперимента позволяет избежать радиопомех на низкой околоземной орбите [23]. Исследования с использованием нового радиотелескопа могут пролить свет на процессы реионизации, происходившие в ранней Вселенной, и помочь определить характеристики первых звёздных популяций. NCLE имеет особое значение для развития низкочастотной радиоастрономии и предоставляет уникальную возможность для изучения космологической истории Вселенной.

Мировой опыт показывает, что спутниковые технологии играют важную роль в индустриализации космоса, обеспечивая связь, навигацию, наблюдение и другие ключевые услуги, которые становятся основой для эволюции космической экономики. Кроме того, спутники являются существенным элементом инфраструктуры для освоения Луны, особенно её обратной стороны. Вместе с тем они облегчают доступ к космическим данным и ресурсам, что способствует расширению возможностей для производства в космосе и внедрению новых технологий.

Перспективы добычи ресурсов в космосе

Исследование космоса с целью добычи ресурсов (космическая горнодобыча) является перспективным направлением, предполагающим извлечение полезных ископаемых с астероидов, Луны, планет Солнечной системы и их спутников. Эта деятельность обещает значительные выгоды, включая доступ к редким и ценным материалам, а также потенциальное снижение нагрузки на земные запасы. Промышленное освоение астероидов подразумевает добычу сырья на них и других космических телах в поясе астероидов, особенно в околоземном пространстве.

Спектроскопическое исследование метеоритов показало наличие в них ценных веществ – никеля, железа, платиноидов, воды, замёрзших газов и др. Ведётся создание мощных ракет-носителей, автоматических межпланетных станций, систем жизнеобеспечения, а также технологий для дистанционного зондирования и анализа этих ресурсов. Ключевую роль в автоматизации процессов их добычи и переработки в космосе играют робототехника и искусственный интеллект.

Несколько стран и частных компаний активно действуют в рамках программ по добыче ресурсов за пределами Земли. Здесь можно выделить американский проект Artemis и ряд инициатив, предлагаемых негосударственными организациями, такими как AstroForge, Trans Astronautica Corporation и Karman+.

Одним из наиболее перспективных направлений является добыча на Луне гелия-3 – редкого на Земле изотопа, который может быть использован в термоядерных реакторах в качестве экологически чистого источника энергии. Лунный грунт содержит значительные запасы данного вещества, накопленные в течение миллиардов лет под воздействием солнечного ветра. Извлечение гелия-3 из поверхностного слоя Луны происходит в результате нагрева реголита до 600–700 °C, что позволяет добыть до 75 % имеющегося в нём изотопа. Несколько частных компаний, например Interlune, уже разрабатывают технологии добычи гелия-3 на Луне [24]. Они планируют начать

с демонстрационных миссий, а затем перейти к промышленному производству и транспортировке вещества на Землю (рисунок 7).

Рисунок 7 – Прототип экскаватора Interlune, разработанный совместно с Vermeer, проходит испытания в Пелле (штат Айова, США) [25]

Космическая добыча открывает широкие возможности, однако на сегодняшний день существует множество препятствий, делающих её отдалённой перспективой. Речь идёт не только о технологических, но и об экономических и правовых вызовах.

Юридические аспекты добычи ресурсов в космосе регламентированы международным космическим правом и национальным законодательством. Вместе с тем ключевые вопросы, такие как право собственности на данные ресурсы, ответственность за ущерб, причинённый в космосе, и защита космической среды, требуют урегулирования.

Несмотря на развитие соответствующих технологий, в том числе производство многоразовых ракет-носителей, высокая стоимость доставки грузов на орбиту в настоящее время нивелирует экономическую целесообразность космической деятельности. В связи с этим особо актуальными становятся исследования ООО «Астроинженерные технологии» в области создания ОТС, предназначенного для выведения грузов на низкую околоземную орбиту [3]. Геокосмический летательный аппарат способен существенно снизить затраты на их транспортировку в космос и обратно.

Таким образом, перспективы освоения космических ресурсов выглядят многообещающими. Их добыча, безусловно, потребует максимальных технологических усилий и инвестиций, но может стать катализатором для развития экономики и новых технологий.

Подготовка к колонизации Луны и Марса

Одно из самых амбициозных направлений развития космической индустрии – подготовка к колонизации Луны и Марса, представляющая собой сложную и многогранную задачу, которая требует разработки новых технологий, создания инфраструктуры и решения множества логистических и организационных вопросов.

Деятельность в данной сфере осуществляется в рамках программы Artemis – серии космических миссий, организованных NASA с целью повторной высадки человека на Луну и сохранения там постоянного присутствия, а также подготовки к полётам на Марс. Основными компонентами проекта являются сверхтяжёлая ракета-носитель Space Launch System (SLS), космический корабль Orion и лунная орбитальная станция Gateway. Программа состоит из нескольких этапов: беспилотный испытательный полёт (Artemis I, 2022 г.), первый пилотируемый полёт (Artemis II, 2026 г.), высадка астронавтов на Луну (Artemis III, 2027 г.) и др. Всего предусмотрено 10 миссий Artemis по исследованию Луны и сооружению лунной базы [26].

На сегодняшний день программа Artemis столкнулась с рядом задержек и трудностей, таких как перенос сроков запуска SLS, судебные разбирательства, недостаточное финансирование и необходимость разработки оборудования, например скафандров. В целом Artemis – это крупный и амбициозный проект, который имеет целью не только осуществление новых полётов человека на Луну, но и построение базы для дальнейшего освоения космоса, в том числе полётов на Марс [27].

Космическую программу, направленную на исследование Марса и в конечном итоге на его колонизацию, активно развивает Китай. Основные усилия сосредоточены на автоматических миссиях, в частности «Тяньвэнь-1», и создании технологий для пилотируемых полётов.

«Тяньвэнь» – масштабная программа по изучению Солнечной системы, реализуемая Китайским национальным космическим управлением (CNSA) [28] и включающая в себя несколько этапов, каждый из которых посвящён определённой планете или небесному телу.

Первым этапом стала миссия «Тяньвэнь-1», состоящая из орбитального аппарата и марсохода «Чжужун». Зонд был запущен в июле 2020 г. и достиг Марса в феврале 2021 г. Марсоход приземлился на равнине Утопия 14 мая 2021 г.

Ещё одно выдающееся достижение Китая – прилунение 2 июня 2024 г. космического аппарата «Чанъэ-6», который совершил посадку на обратной стороне Луны, собрал образцы лунного грунта и доставил их на Землю. Это первая в истории подобная миссия, выполненная успешно [29].

Над проектом колонизации Марса активно работает SpaceX. Компания занимается производством ракеты Starship, предназначенной для перевозки людей и грузов на Марс, и планирует её беспилотный запуск в конце 2026 г., а пилотируемый полёт – в начале 2030-х годов [30].

Отдельно стоит отметить робота ReachBot (рисунок 8), созданного командой инженеров из Стэнфордского университета на основании наблюдений за движениями пауков-сенокосцев. Робота предполагается задействовать для исследования сложной местности (пещер) Марса. Конструкция имеет выдвижные ноги-манипуляторы с захватами, позволяющими перемещаться по различным поверхностям, в том числе по стенам и потолкам пещер. ReachBot использует систему обработки изображений и процессоры для навигации и выбора оптимальных точек крепления [31].

Рисунок 8 – Тестирование стрелы робота ReachBot

В мае 2024 г. успешно протестирован частичный прототип ReachBot: собран одиночный выносной манипулятор (стрела + захват) на штативе и испытан в лавовой трубе в пустыне Мохаве. В июле 2024 г. опубликованы результаты симуляций, подтверждающие, что система способна планировать захваты с надёжной фиксацией. Это открывает новые возможности для поиска следов внеземной жизни и получения ценной информации о геологической истории небесных тел.

В России намечается запуск автоматической межпланетной станции «Фобос-Грунт 2». Цель – доставка образцов грунта с Фобоса на Землю, изучение процессов на Фобосе и происхождения спутников Марса. Программа является продолжением проекта «Фобос-Грунт» и основана на его опыте. В случае успеха данной миссии значительно повысится потенциал для промышленного освоения космоса. Главная ценность программы – отработка технологий, необходимых для будущих межпланетных миссий, включая доставку грузов с других планет, что создаёт перспективы для добычи ресурсов и строительства космических баз.

Подготовка к колонизации Луны и Марса требует огромных инвестиций и усилий, однако это позволит расширить границы нашего обитания во Вселенной.

Роль частных компаний в развитии космической индустрии

В последние годы значительно возросла роль частных структур в развитии космической индустрии. SpaceX, Blue Origin, Virgin Galactic, ООО «Астроинженерные технологии» и другие компании активно инвестируют в разработку новых технологий, создание инфраструктуры и предоставление космических услуг. Основные аспекты их вклада:

- снижение стоимости запусков;
- ускорение инноваций;
- коммерциализация орбиты;
- разгрузка государственных агентств;
- формирование экосистемы космических стартапов;
- развитие международного сотрудничества.

Конкуренция между частными компаниями стимулирует инновации и снижает стоимость космических полётов. Кроме того, данные организации более гибкие и динамичные, чем государственные космические агентства, что позволяет коммерческим структурам быстрее адаптироваться к изменяющимся условиям рынка.

Частные компании не только способствуют коммерциализации космоса, но и оказывают значительное влияние на космическую гонку между странами. Их достижения, например в области многоразовых ракет, заставляют государственные агентства пересматривать свои стратегии и подходы к космическим полётам.

Сотрудничество между частными и государственными структурами становится важным фактором успеха в развитии

космической индустрии. NASA, ESA и «Роскосмос» финансируют коммерческие научные исследования, совместно разрабатывают перспективные технологии и осуществляют крупные космические проекты.

Кроме того, частные компании формируют новую модель космической экономики. Их вклад делает космос более доступным, технологически продвинутым и экономически привлекательным. Однако современные методы – в основном ракетные технологии – сталкиваются с рядом серьёзных ограничений, которые сдерживают прогресс и масштабное вовлечение человечества во внеземные проекты.

Главные недостатки традиционных подходов в освоении космоса:

- высокая стоимость запусков: даже с учётом достижений компаний, подобных SpaceX, стоимость доставки груза на орбиту остаётся колоссальной;
- низкая экологичность: ракетные старты сопровождаются вредными выбросами в атмосферу, разрушением озонового слоя и загрязнением космического пространства отработанными ступенями и мусором;
- ограниченная безопасность и надёжность: полёты ракет сопряжены с высоким уровнем риска (от сбоев при запуске до разрушения полезной нагрузки);
- транспортная неэффективность: ракеты являются одноразовыми или частично многоразовыми. Кроме того, они требуют серьёзной технической подготовки перед каждым стартом, что тормозит частоту и масштабность космических миссий.

На этом фоне становится очевидной необходимость альтернативных, более устойчивых и масштабируемых решений.

Альтернативный путь индустриализации космоса

В контексте развития современной космической индустрии важно рассмотреть альтернативные концепции, в том числе разработанные А.Э. Юницким и созданной им компанией «Астроинженерные технологии» [6]. А.Э. Юницкий выступает новатором, предлагая геокосмическую программу безракетного освоения ближнего космоса uSpace (составляющая программы «ЭкоМир»), которая предусматривает вынос вредной части земной индустрии за пределы нашей планеты. Это даст возможность решить не только экономические проблемы использования околоземного пространства, но и станет решением большинства глобальных экологических проблем.

Центральным элементом программы uSpace является ОТС (рисунок 9) – замкнутая кольцевая структура, охватывающая экватор Земли и позволяющая выводить грузы в космос за счёт центробежной силы, без применения ракетных двигателей [3]. Данный летательный аппарат может способствовать устойчивому развитию цивилизации, объединяя функции транспорта, энергетики, экологии и космической деятельности.

Рисунок 9 – ОТС (визуализация) [32]

Ещё одна альтернативная концепция индустриализации космоса – широко известная идея создания космического лифта. Это теоретическая конструкция, включающая:

- наземную станцию, расположенную вблизи экватора;
- трос, протянутый от Земли к геостационарной орбите (высота 35 786 км);
- орбитальный противовес, удерживающий трос в натяжении за счёт центробежной силы;
- подъёмники (климеры), движущиеся по тросу с помощью электродвигателей или лазерной энергии.

На сегодняшний день серьёзным препятствием на пути реализации данной идеи является отсутствие материалов, из которых можно было бы создать трос космического лифта, способный выдерживать огромные нагрузки.

Идея безракетного освоения космоса, лежащая в основе программы uSpace, предполагает, что индустриализация околоземного пространства должна быть направлена на перенос энергетически и экологически грязных производств (например, металлургии, химической промышленности, энергетики) за пределы планеты. Это позволит существенно уменьшить негативное воздействие на земную биосферу.

В космосе, применяя энергию Солнца и ресурсы, добытые на астероидах и Луне, можно создать замкнутые экосистемы для производства необходимых материалов и энергии без ущерба для Земли.

В отличие от ракетных запусков, которые сопровождаются значительным загрязнением окружающей среды, использованием дорогостоящего топлива и риском аварий, неракетные способы доступа в космос, такие как ОТС и космический лифт, представляются более экологичными, экономичными и безопасными. Инженер А.Э. Юницкий прогнозирует, что реализация этих концепций даст возможность максимально снизить стоимость вывода грузов на орбиту и станет катализатором для индустриализации околоземного пространства и переноса промышленных мощностей за пределы планеты [2, 33, 34].

С целью популяризации идей безракетной индустриализации космоса под руководством А.Э. Юницкого организуются конференции, где обсуждаются инновационные подходы и технологии.

Заключение

За последнее десятилетие космическая отрасль продемонстрировала впечатляющие результаты в освоении околоземного пространства. Снижение стоимости доступа в космос, развитие спутниковых группировок, достижения в области космического производства и добычи ресурсов, а также подготовка к колонизации Луны и Марса – всё это позволяет сделать вывод, что мы находимся на пороге новой эры.

В дополнение к традиционным ракетным подходам развиваются альтернативные направления индустриализации космоса, предложенные инженером А.Э. Юницким, акцентирующие внимание на неракетном доступе в околоземное пространство и переносе промышленности за пределы планеты. Несмотря на технологические и экономические вызовы, эти концепции способствуют поиску более эффективных и экологичных путей освоения космоса.

Роль частных компаний в эволюции космической отрасли постоянно возрастает, что стимулирует инновации и снижает стоимость полётов. Однако перед дальнейшим прогрессом стоит ряд технологических, экономических, бюрократических и геополитических преград, которые необходимо преодолеть для реализации амбициозных планов по колонизации Луны и Марса.

В будущем ожидается распространение идей безракетного освоения космоса, наращивание спутниковых группировок, увеличение объёмов космического производства, активизация подготовки к пилотируемым миссиям на Луну и Марс. Исследование и индустриализация космоса имеют огромный потенциал для развития науки, технологий и экономики, а также для расширения границ человеческого обитания во Вселенной.

Список основных источников

1. *Technology 2040: A Vision for the European Space Agency. – Paris: ESA, 2025. – 68 p. – URL: https://esamultimedia.esa.int/docs/technology/Technology_2040.pdf (date of access: 11.06.2025).*
2. *Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А.Э. Юницкий. – Силакрогс: ПНБ принт, 2019. – 576 с.*
3. *Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 7–8 окт. 2023 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск: СтройМедиаПроект, 2024. – 492 с.*
4. *JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) // JAXA. – URL: https://global.jaxa.jp (date of access: 14.06.2025).*
5. *НАСА // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/НАСА (дата обращения: 11.06.2025).*
6. *uSpace // Astroengineering Technologies. – URL: https://uspaceprogram.com/about (date of access: 11.06.2025)*
7. *About Redwire // Redwire. – URL: https://rdw.com/about/ (date of access: 11.06.2025).*
8. *Brown, D. The Story of the World's First Zero Gravity Printer / D. Brown // Made in Space. – URL: https://madeinspace.us/story-of-the-worlds-first-zero-gravity-printer/. – Publ. date: 07.12.2023.*
9. *On-Orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing 2 (OSAM-2) // NASA. – URL: https://www.nasa.gov/mission/on-orbit-servicing-assembly-and-manufacturing-2-osam-2/ (date of access: 12.06.2025).*
10. *Wall, M. Made in Space Sets Guinness World Record for Longest 3D-Printed Piece / M. Wall // Space.com. – URL: https://www.space.com/39790-made-in-space-3d-printing-guinness-world-records.html (date of access: 16.06.2025).*
11. *Бритенков, А. Металл впервые напечатали на 3D-принтере в космосе / А. Бритенков // Hi-Tech Mail. –*

URL: https://hi-tech.mail.ru/news/110736-metall-vpervye-napechatali-na-3d-printere-v-kosmose. – Дата публ.: 05.06.2024.

12. НАСА и Techshot разрабатывают 3D-печать органов в космосе // 3D for You. – URL: https://3d4u.com.ua/ru/blog/post/47-nasa-and-techshot-develop-3d-printing-of-organs-in-space?srsltid=AfmBOooJeSrUo73eDa1XTAIKIIGq3yJDT1qk0R-CM3Dwk8ZcwWP_cr-6. – Дата публ.: 13.03.2019.
13. Если очень захотеть! Почему эксперименты по биопечати проводятся в космосе // ISpaceman. – URL: https://www.ispaceman.ru/esli-ochen-zahotet-pochemy-eksperimenty-po-biopechati-provodiatsia-v-kosmose (дата обращения: 15.06.2025).
14. Орган.Авт // Zdrav.expert. – URL: https://zdrav.expert/index.php/Продукт:Орган.Авт (дата обращения: 15.06.2025).
15. Falcon 9. First Orbital Class Rocket Capable of Reflight // SpaceX. – URL: https://www.spacex.com/vehicles/falcon-9/ (date of access: 11.06.2025).
16. Berger, E. Liftoff: Elon Musk and the Desperate Early Days That Launched SpaceX / E. Berger. – New York: HarperCollins, 2021. – 304 p.
17. Ракета Falcon 9 вывела пилотируемый корабль на орбиту // Коммерсантъ. – URL: https://www.kommersant.ru/doc/4574180. – Дата публ.: 16.11.2020.
18. Бокова, И. Миссия Axiom. Как путешественники попадают в космос и сколько это стоит / И. Бокова // Hi-Tech Mail. – URL: https://hi-tech.mail.ru/review/111084-missiya-axiom/. – Дата публ.: 22.08.2024.
19. Axiom Space // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Axiom_Space (дата обращения: 13.06.2025).
20. Китайский стартап совершил первую морскую вертикальную посадку многоразовой ракеты // Shazoo. – URL: https://shazoo.ru/2025/06/03/168528/kitaiskii-startap-soversil-pervuiu-morskuiu-vertikalnuiu-posadku-mnogorazovoi-rakety. – Дата публ.: 03.06.2025.
21. Новое поколение спутников Starlink будет в 2 раза больше и в 5 раз тяжелее // Shazoo. – URL: https://shazoo.ru/2022/06/01/127357/novoe-pokolenie-sputnikov-starlink-budet-v-2-raza-bolse-i-v-5-raz-tyazelee. – Дата публ.: 01.06.2022.
22. БелКА (спутник) // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/БелКА_(спутник) (дата обращения 01.07.2025).
23. Цюэцяо // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Цюэцяо (дата обращения: 14.06.2025).
24. Добычу гелия-3 собираются начать уже в 2028 году. Кому и зачем это нужно? // Хабр. – URL: https://habr.com/ru/companies/ru_mts/articles/800909/. – Дата публ.: 18.03.2024.
25. Скрипач, Д. Стартап Interlune показал прототип машины для добычи гелия-3 на Луне / Д. Скрипач // Naked Science. – URL: https://naked-science.ru/community/1080626. – Дата публ.: 20.06.2025.
26. Артемида (космическая программа) // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Артемида_(космическая_программа) (дата обращения: 14.06.2025).
27. Artemis // NASA. – URL: https://www.nasa.gov/humans-in-space/artemis/ (date of access: 14.06.2025).
28. Тяньвэнь (космическая программа) // Циклопедия. – URL: https://cyclowiki.org/wiki/Тяньвэнь_(космическая_программа) (дата обращения: 14.06.2025).
29. Зонд «Чанъэ-6» доставил образцы грунта с обратной стороны Луны на орбитальный модуль // Хабр. – URL: https://habr.com/ru/news/820015/. – Дата публ.: 06.06.2024.
30. Weaver, S. Elon Musk Unveils SpaceX's Latest Plans for Colonizing Mars / S. Weaver // LiveNOW from FOX. – URL: https://www.livenowfox.com/news/elon-musk-spacex-plans-mars. – Publ. date: 30.05.2025.
31. Шемякинская, Е. Робота-паука для марсианских пещер показали на видео / Е. Шемякинская // Hi-Tech Mail. – URL: https://hi-tech.mail.ru/news/108923-robota-pauka-dlya-marsianskih-pesher-pokazali-na-video/. – Дата публ.: 21.04.2024.
32. Общепланетарное транспортное средство // Astroengineering Technologies. – URL: https://uspaceprogram.com/general_transport (дата обращения 16.06.2025).
33. uSpace – геокосмическая программа безракетного освоения ближнего космоса для спасения жизни на Земле // Юницкий Анатолий Эдуардович. – URL: https://unitsky.engineer/uspace (дата обращения: 16.06.2025).
34. Глобальная конференция по индустриализации ближнего космоса // Astroengineering Technologies. – URL: https://uspaceprogram.com/conference/ (дата обращения: 01.07.2025).

УДК 005.8+629.7

Обоснование механизмов поддержки принятия решений в системах управления проектами программы «ЭкоМир»

А.А. Гуринович[1, 2]

П.С. Серенков[2]
доктор технических наук

[1] ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

[2] Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

Цель работы – снизить риски, возникающие при реализации программы «ЭкоМир», за счёт применения методологии организационного проектирования сложных систем управления (СУ), ключевой элемент которой – создание эффективной системы поддержки принятия решений (СППР) на всех этапах жизненного цикла проекта. Рассмотрена проблема корректности принятия решений в проектных организациях, задействованных в выполнении программы «ЭкоМир». Сложность касается процесса выбора приоритетов при перераспределении ресурсов между параллельными проектами в часто встречающихся форс-мажорных ситуациях. Аргументирована актуальность устранения данной проблемы, являющейся типовой для компаний различного профиля и размеров и способной привести к серьёзным финансовым и имиджевым потерям в случае неверно принятых решений.

Для устранения проблем, связанных с выбором приоритетов, предложено использование методологии организационного проектирования сложных СУ. Обосновано, что в проектируемой СУ ключевая роль принадлежит СППР, которая должна быть сформирована на базе модели сети процессов. С этой целью мегапроект «ЭкоМир» рассмотрен как бизнес-процесс, модель которого представлена как сеть процессов различных категорий и выполняемых отдельными проектно-ориентированными организациями. Для обеспечения совокупной результативности мегапроекта, в том числе синхронности выполнения процессов сети при минимальных затратах, предложен оригинальный механизм реализации СППР как экспертной системы. Он предусматривает возможность появления в деятельности организации полного множества потенциальных ситуаций, связанных с нарушением запланированного регламента исполнения потока отдельных проектов и, соответственно, невозможностью их осуществления в силу ограниченности ресурсов. Для всех типовых ситуаций сформулированы задачи и описаны алгоритмы поддержки принятия решений, использующие экспертные методы, которые гарантируют корректный выход из сложившейся ситуации.

Методологическая ценность предложенного способа устранения проблемы заключается в универсальности данной концепции СППР, которая применима в организациях любого профиля, занимающихся проектами различной сложности и масштаба.

Ключевые слова:
программа «ЭкоМир», риски реализации проектов, система поддержки принятия решений, система управления, экспертные методы.

UDC 005.8+629.7

Justification of Decision Support Mechanisms in Project Management Systems of EcoSpace Program

A. Hurynovich [1, 2]

P. Serenkov [2]
Doctor of Engineering Sciences

[1] Unitsky String Technologies Inc., Minsk, Belarus

[2] Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

The aim of this study is to reduce the risks arising during the implementation of the EcoSpace program through the application of the methodology of organizational design of complex management systems (MS). A key element of this methodology is the development of an effective decision support system (DSS) at all stages of the project lifecycle. The paper addresses the problem of decision-making accuracy in project-oriented organizations involved in the implementation of the EcoSpace program. The complexity lies in the process of prioritization when reallocating resources among parallel projects, particularly in frequently occurring force majeure situations. The necessity of eliminating this problem is substantiated, as it is typical for companies of various profiles and sizes and may lead to significant financial and reputational losses in the case of incorrect decisions.

To address the challenges associated with prioritization, a methodology for the organizational design of complex MS is proposed. It is substantiated that within the designed MS, a key role is assigned to the DSS, which should be developed based on a process network model. For this purpose, the EcoSpace megaproject is considered as a business process whose model is represented as a network of processes of various categories and executed (performed) by individual project-oriented organizations. To ensure the overall effectiveness of the megaproject, including synchronous execution of network processes with minimal cost, an original mechanism for implementing the DSS as an expert system is proposed. This mechanism accounts for the possibility of the full range of potential situations arising in organizational activities, related to deviations from the planned execution flow of individual projects and, consequently, their infeasibility due to resource limitations. For all typical situations, decision-making tasks are defined and decision support algorithms based on expert methods are described; these algorithms guarantee a correct resolution of the arisen situations.

The methodological value of the proposed approach lies in the universality of the DSS concept, which is applicable to organizations of any profile engaged in projects of varying complexity and scale.

Keywords:
decision support system,
EcoSpace program,
expert methods,
management system,
project implementation risks.

Введение

Программа «ЭкоМир» представляет собой мегапроект – глобальный бизнес-процесс, который имеет горизонтальную и вертикальную иерархию. Проект объединяет совокупность отраслеобразующих элементов (транспорт, энергетика, урбанистика, сельское хозяйство и др.) [1], а также комплекс процессов сопровождения данной программы: экологических, энергетических, социальных, экономических.

Подобного рода мегапроект можно рассмотреть в виде функциональной модели, состоящей из необходимых для выполнения бизнес-процессов нескольких уровней, которые после декомпозиции до более простых проектов или задач будут проводиться отдельными организациями различного профиля. На рисунке 1 приведена такая модель для программы «ЭкоМир», построенная безотносительно к организационной структуре и включающая два уровня:

1) разработка мегапроекта как бизнес-процесса;

2) реализация мегапроекта как бизнес-процесса.

При этом согласно основам системного менеджмента только выполнение всех бизнес-процессов в совокупности будет гарантировать результативность и эффективность реализации программы [2, 3] .

Для обеспечения управляемых условий каждый элемент мегапроекта должен быть представлен в виде локальной системы управления (СУ). Только эффективная и результативная СУ позволяет планировать, поддерживать и совершенствовать как каждый элемент, так и мегапроект в целом [4–6]. Следовательно, задача сводится к построению СУ для каждого элемента – проекта, выполняемого организацией (рисунок 2). Для этих целей существует разработанная методология организационного проектирования сложных СУ [7–9] и применяется несколько подходов: гуманистический (социология и психология), эмпирический (использование прецедентного опыта успешного руководства) и инженерный (рисунок 3).

Согласно инженерному подходу к проектированию сложных СУ, которые были бы результативны и эффективны, базирующемуся на объективных законах процессного подхода, СУ представляют в виде функциональной модели сети процессов и соответствующих им информационных потоков [7–9].

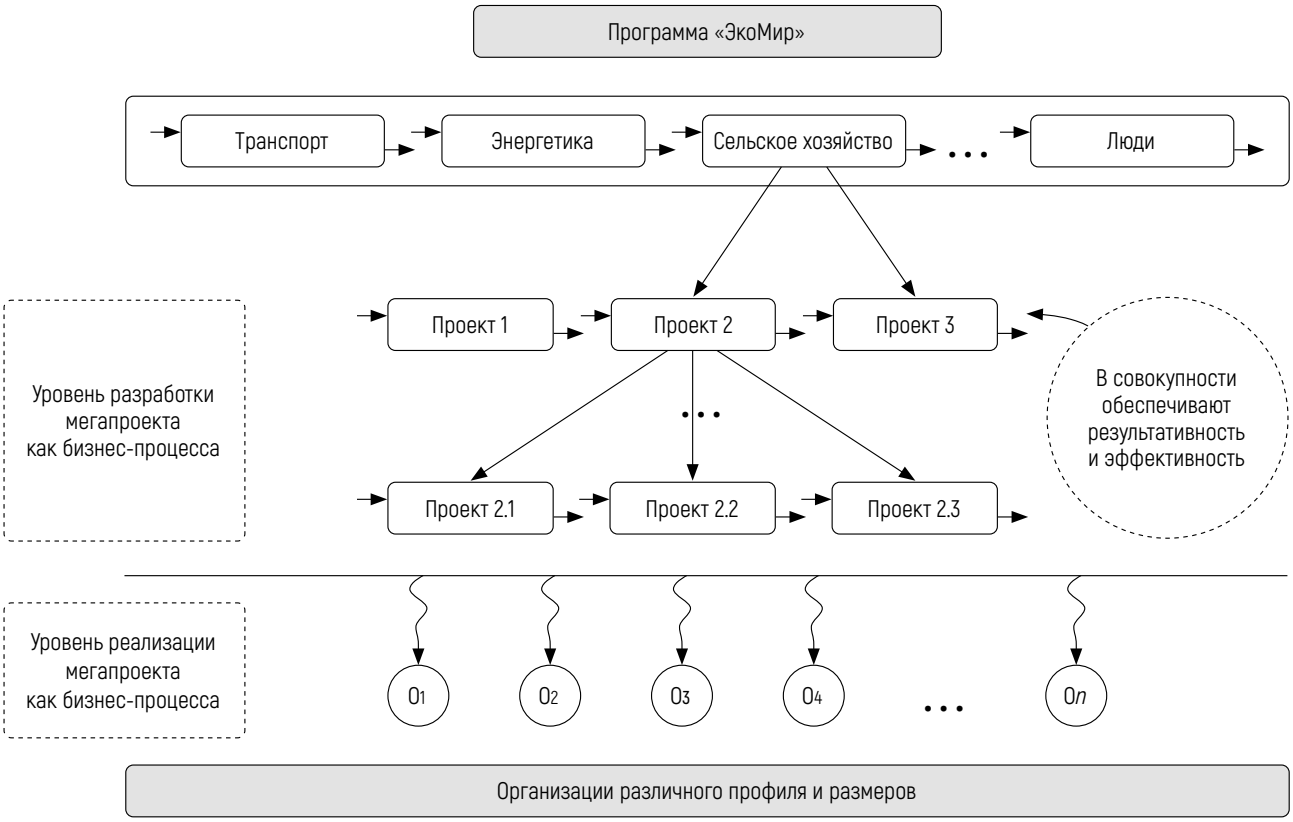


Рисунок 1 – Функциональная модель бизнес-процессов программы «ЭкоМир»

Корректно построенная модель позволяет определить и структурировать процессы, необходимые системе менеджмента, и обладает свойством полезности для решения целого комплекса управленческих задач организации. В частности, функциональная модель сети процессов выступает основой формирования эффективных функциональных подсистем СУ:

- подсистема целеполагания;
- система сбора и анализа данных (ССАД);
- система поддержки принятия решений (СППР) [7].

В совокупности разработку функциональной модели сети процессов СУ и трёх подсистем можно представить как типовую программу проведения полного цикла менеджмента (организационно-технической/инженерной деятельности компании). Такая архитектура инженерной составляющей системы менеджмента обеспечивает реализацию принципов процессного подхода: управление, основанное на свидетельствах, а также необходимую организационную и информационную поддержку деятельности предприятия со стороны руководства [7–10].

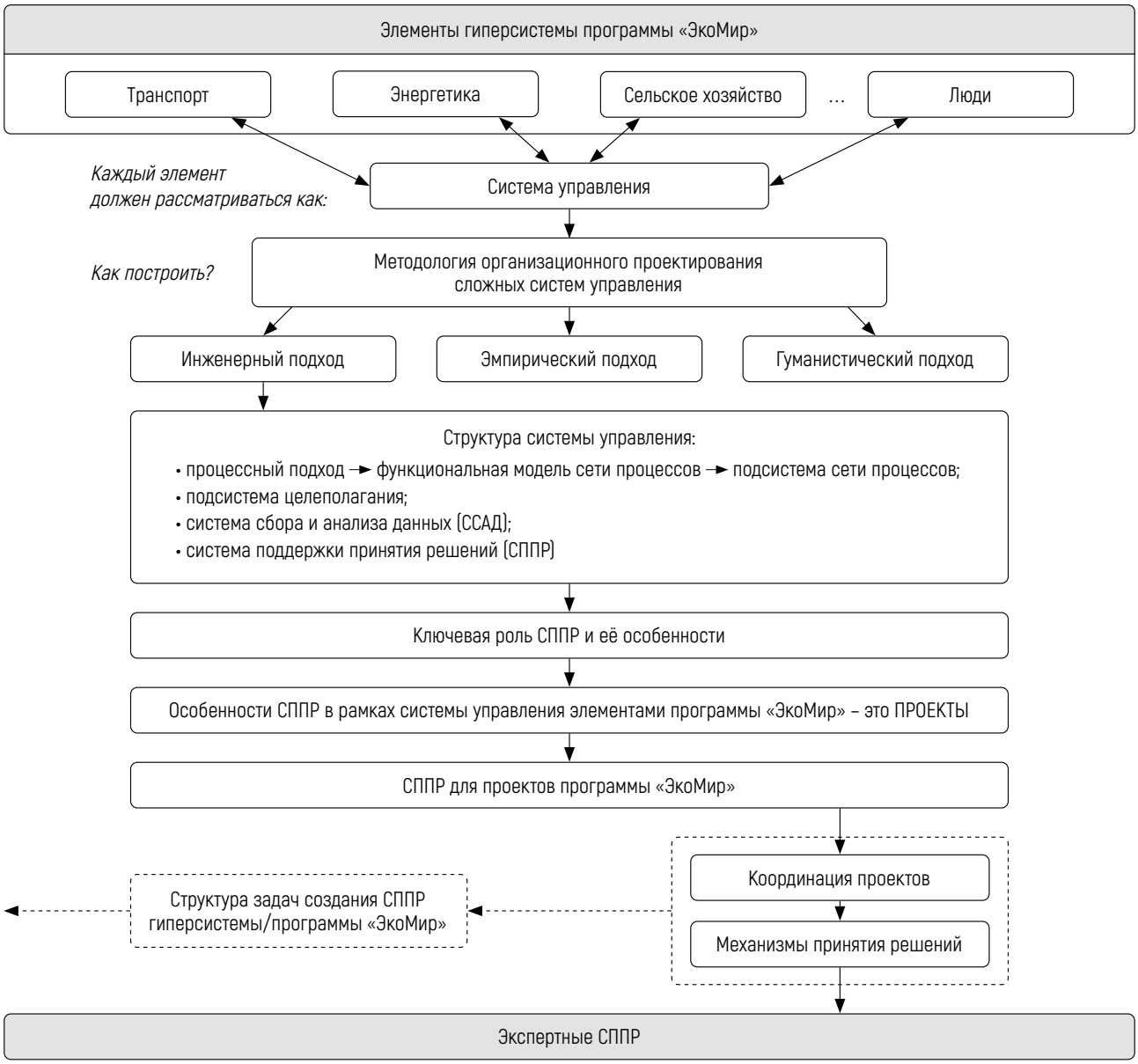


Рисунок 2 – Общая структура СППР программы «Экомир»

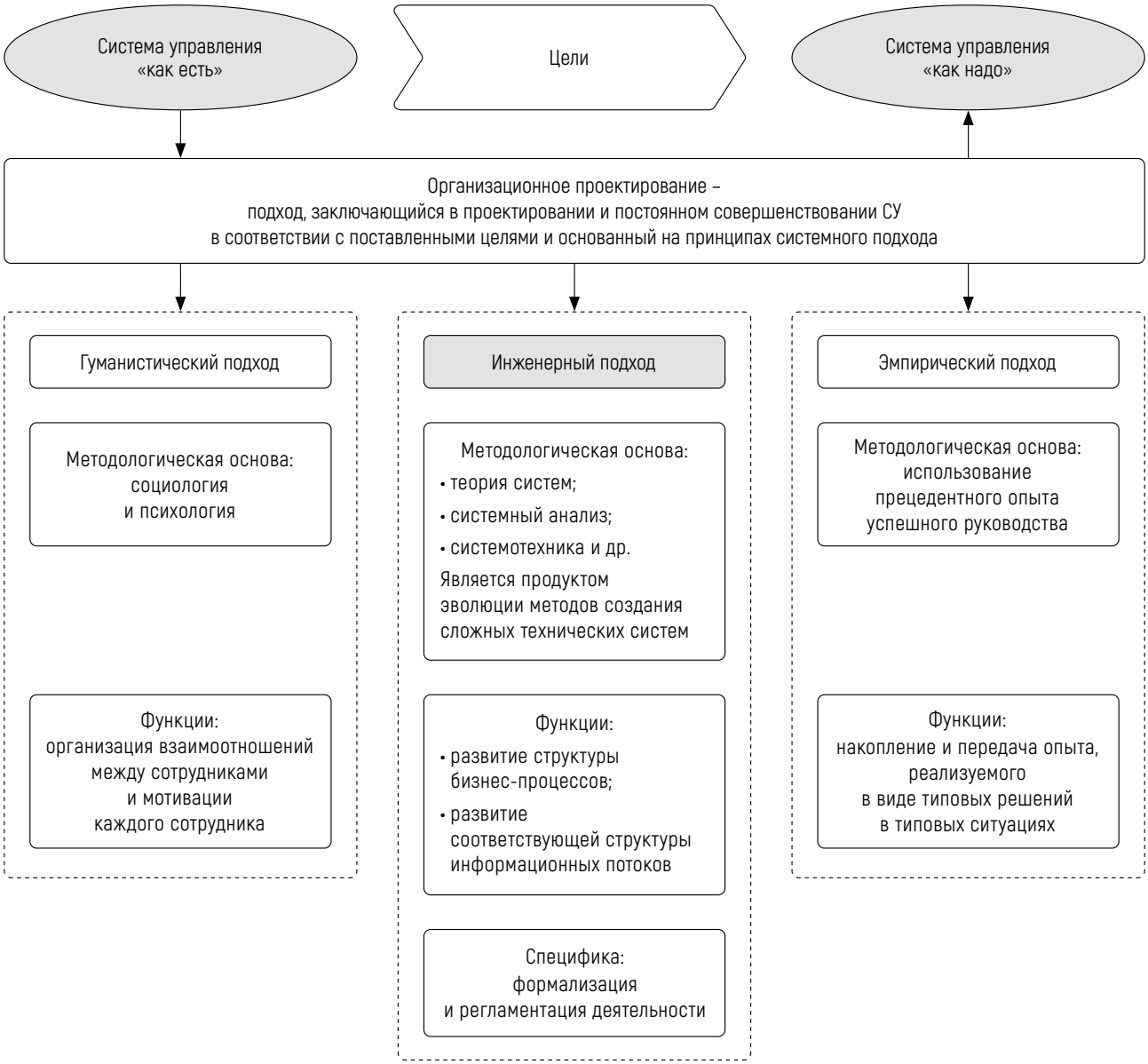


Рисунок 3 – Структура методологии организационного проектирования СУ

Таким образом, менеджмент в организации является довольно сложной системой взаимосвязанных управленческих процедур, обслуживающих сеть процессов и определяющих результативность, а также эффективность выполнения проекта. Этот аспект особо подчёркивается и положен во главу угла стандартом СТБ ISO 9004, представляющим собой руководство по созданию конкурентоспособной системы менеджмента организации на основе системы менеджмента качества [3]. Учитывая значимость программы «ЭкоМир» как мегапроекта, а также её сложность и комплексный характер, цель работы заключается в снижении рисков нереализации элементов программы (бизнес-процессов различных категорий) в установленные сроки и с заданными показателями результативности за счёт применения методологии организационного проектирования сложных СУ. Должное внимание уделено основополагающему элементу СУ бизнес-процессом программы «ЭкоМир» – функциональной подсистеме СППР на всех этапах жизненного цикла проекта.

Ключевая роль системы поддержки принятия решений и её особенности

Очевидно, что результатом менеджмента всегда является решение и любая СУ предназначена в конечном счёте для генерирования эффективных управляющих действий. Особенность системы поддержки принятия управленческих решений заключается в том, что она, с одной стороны, замыкает цикл моделирования, а с другой – инициирует активные действия (корректирующие, предупреждающие, улучшающие). СППР, по нашему мнению, выступает ключевой подсистемой, поскольку принимает решение в отношении чего угодно – процессов, продукции, ресурсов и др. – и в итоге формирует результат всей СУ (рисунок 2).

Установлено, что в области менеджмента этап принятия управленческих решений на данный момент не имеет существенной научной и методической проработки. Сегодня это, скорее, искусство, в основном определяемое личностью руководителя, а не системно организованная повседневная деятельность менеджера/координатора проекта. В связи с этим создание корректной модели СППР – необходимое условие не только результативного и эффективного функционирования СУ, но и реализации всего цикла организационно-технических мероприятий в процессе её дальнейшего совершенствования [11–14].

Особенности формирования систем управления элементами программы «ЭкоМир»

Ключевой особенностью СППР в рамках СУ элементами программы «ЭкоМир» является то, что каждый элемент – это бизнес-процесс определённой категории, реализуемый как проект. Соответственно, и организации, выполняющие их, будут проектно-ориентированными.

Авторами проанализирована деятельность такой организации и установлено множество источников дестабилизации, срывающих первоначальный план реализации проектов [15]. Источники дестабилизации, которые можно считать типовыми, как правило, приводят к авральному перемещению ресурсов (специалистов) между параллельными проектами, к простоям или перегрузке оборудования, задействованного для выполнения портфеля проектов, и др. Основные негативные последствия дестабилизации – временные потери (задержки выпуска продукции или исполнения проекта), нерациональное использование ресурсов (недостаточная загрузка или перегрузка персонала и оборудования), что сказывается на результативности и эффективности работы организации (рисунок 4).

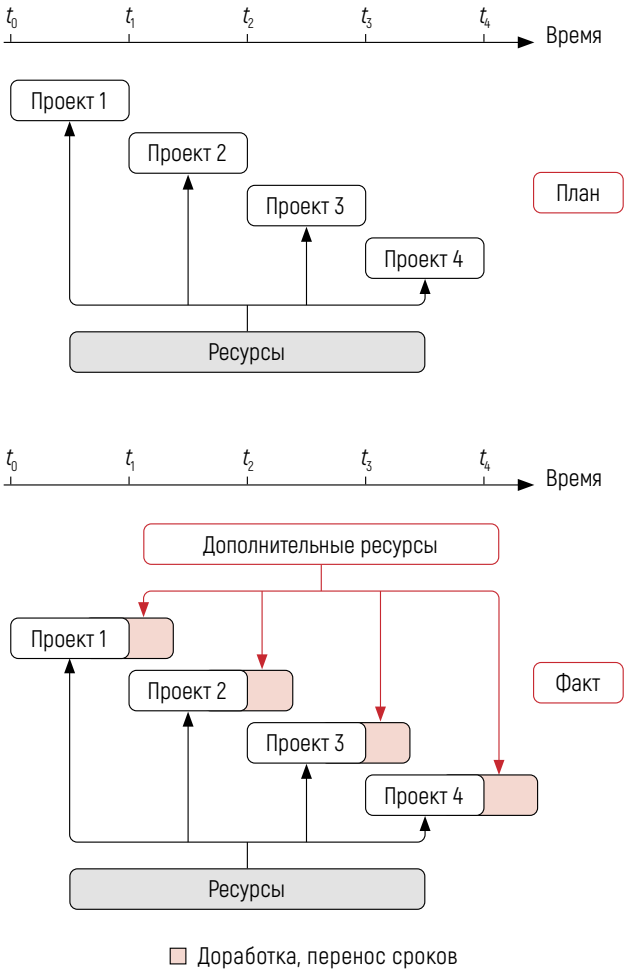


Рисунок 4 – Визуализация последствий нарушения сроков выполнения проектов в проектно-ориентированной организации

Кроме того, в [15] предложен механизм устранения подобной тенденции за счёт корректировки организационной структуры посредством введения в сложившуюся систему процессных и иерархических коммуникаций дополнительного звена – менеджера/координатора проекта или целого структурного подразделения (в зависимости от размера компании и масштабов проектов), реализующих горизонтальную связь между параллельными вертикальными структурными подразделениями (традиционные «колодцы» управления). Назначение данного звена – координация проектов (процессов) в случае сбоя запланированного

производственного ритма (повторной доработки). Важным моментом в такой корректировке является автономность новой структурной единицы от основных подразделений с целью обеспечения независимости её точки зрения и исключения влияния с их стороны, как показано на рисунке 5 [10, 16].

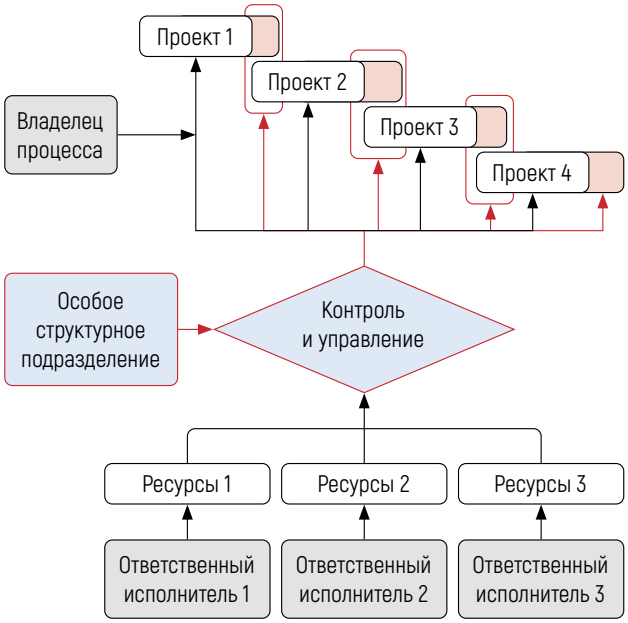


Рисунок 5 – Вариант корректировки организационной структуры

При наличии полной информации и/или чётких указаний от руководства о важности того или иного проекта проблема устраняется без дополнительных усилий. Однако в ситуациях, описанных ранее, координатор будет вынужден делать выбор, имея неполный массив данных, что, естественно, вызывает риск принятия некорректных решений. Следовательно, мы сталкиваемся с необходимостью разработки механизма принятия решений в отношении выделения ресурсов тому или иному проекту в случае их наложения.

Разработка механизмов принятия решений в отношении приоритизации проектов

1. Задача выбора способа принятия решения в отношении накладывающихся проектов.

На основании полного множества возможных ситуаций, когда координатор становится перед выбором, какому проекту отдать предпочтение (с минимальными потерями ресурсов), нами определены три возможных способа действий:

А) выбрать альтернативный вариант: Проект 1 или Проект 2;

Б) раздробить проекты на более мелкие элементы и перераспределить последовательность их выполнения с учётом оптимизации ресурсов;

В) привлечь дополнительные ресурсы.

Право выбора остаётся за координатором или другим лицом, принимающим решение.

2. Задачи в рамках реализации выбранного способа принятия решения.

2.А. Задача выбора альтернативного варианта: выбор одного из рассматриваемых проектов (Проект 1 или Проект 2) осуществляется по альтернативному признаку (либо-либо).

Исходные данные: оба проекта имеют высокий приоритет и отсутствует полный массив сведений о том, какой из них выбрать.

Задача: разработать модель оценки степени предпочтительности проекта по группе показателей (факторов) $X_1, X_2, ..., X_i$.

В этом случае рационально применить так называемую квалиметрическую модель оценки качества:

$$Y = C_1X_1 + C_2X_2 + ... + C_iX_i, \quad (1)$$

где Y – оценка степени предпочтительности альтернативного проекта (одного из рассматриваемых);

X_i – оценка степени выраженности фактора в рамках рассматриваемого альтернативного проекта;

C_i – коэффициенты весомости всех факторов, которые установлены заранее (при составлении модели).

Решение: в первую очередь, формируя модель, мы устанавливаем, какие факторы и в каком количестве необходимо принять во внимание, фактически определяя число слагаемых в модели. Этот этап считается основополагающим, поскольку скрывает в себе потенциально фатальную ошибку: если выбор факторов не соответствует критериям полноты и неизбыточности, например какие-то из факторов не учтены или избыточны, то модель получится совершенно нерепрезентативной, ведь она не будет объективно отражать предпочтения выбора.

В результате рассмотрения полного множества потенциальных вариантов выявлено пять вероятных факторов (рисунок 6).

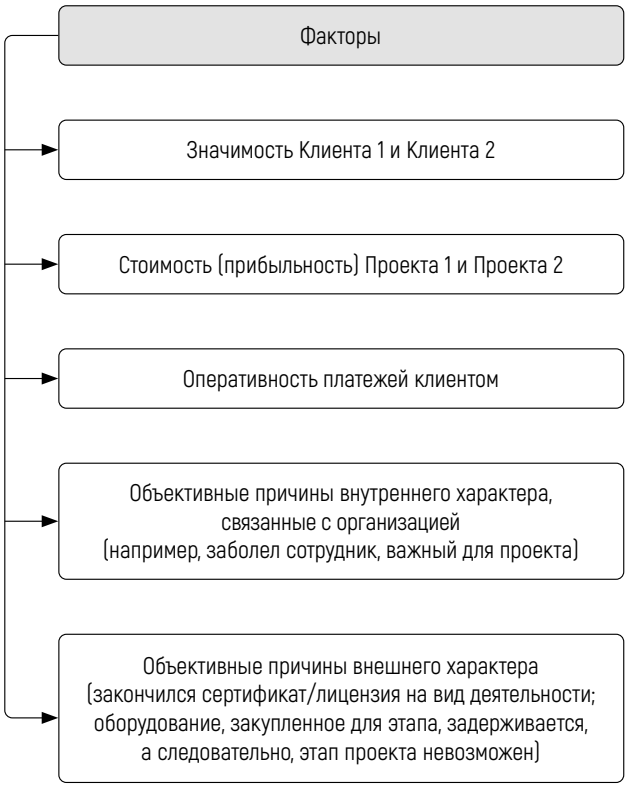


Рисунок 6 – Факторы, определяющие выбор того или иного проекта

В данном случае нет привязки к сфере деятельности организации (строительная, IT, транспортная и др.), так как принятие решения о выборе того или иного проекта будет базироваться на организационных, репутационных и экономических аспектах, определяя, что в конечном счете важнее.

На основании информации из рисунка 6 можно заключить, что наша модель будет иметь пять влияющих факторов и выражение (1) примет вид:

$$Y = C_1X_1 + C_2X_2 + ... + C_5X_5. \quad (2)$$

Далее необходимо оценить коэффициенты весомости каждого фактора. Суть модели состоит в том, что у каждого проекта X_i могут быть разными, поскольку оценка степени выраженности фактора в каждом проекте своя. Коэффициенты C_i – величины постоянные. Причём рационально сразу задать шкалы: X_i от 1 до 10 (например, заказчик не важный – 1 балл, очень важный – 10 баллов), а сумма коэффициентов C_i должна быть равна 1. Тогда при любых значениях X_i и C_i оценка степени предпочтительности Y всегда будет находиться в диапазоне от 1 до 10.

Таким образом, по формуле (2) можно рассчитать $Y_{Пр1}$ и $Y_{Пр2}$ – интегральные характеристики степени предпочтительности по пяти факторам Проекта 1 и Проекта 2 соответственно. При этом данная характеристика является взвешенной, поскольку выражена через коэффициенты весомости.

У какого из проектов Y выше, у того выше и предпочтительность. Координатор принимает это к сведению и на основании полученной информации делает выбор.

2.Б. Задача разработки механизма оптимизации: раздробить проекты на более мелкие элементы (этапы/процессы) и перераспределить последовательность их выполнения с учётом оптимизации ресурсов. В рассматриваемом способе стоит выделить три условия.

Условие 1.

Исходные данные: этапы выполнения Проекта 1 и Проекта 2 параллельны и не похожи между собой, но имеется возможность поменять последовательность выполнения; ресурсы одни и те же (рисунок 7).

Задача: поменять последовательность выполнения этапов проекта таким способом, чтобы они не накладывались один на другой по части ресурсов.

Решение: для этого случая нет конкретного решения, возможно типовое, основанное на опыте, в каждой ситуации оно творческое, принимается на месте.

Результат: скорректированный план-график выполнения параллельных проектов за счёт изменения последовательности выполнения их этапов.

Условие 2.

Исходные данные: этапы выполнения Проекта 1 и Проекта 2 параллельны, но похожи между собой (полностью или частично); ресурсы одни и те же (рисунок 8).

Задача: поменять последовательность выполнения этапов проектов таким способом, чтобы одновременно выполнялись схожие этапы (целиком или их части).

Решение: для этого случая нет конкретного решения, возможно типовое, основанное на опыте, в каждой ситуации оно творческое, принимается на месте.

Результат: скорректированный план-график выполнения параллельных проектов за счёт совмещения похожих этапов.

Условие 3.

Исходные данные: этапы выполнения Проекта 1 и Проекта 2 параллельны и не похожи между собой, при этом нет возможности менять последовательность выполнения этапов; ресурсы одни и те же.

Решение/результат: отсутствует. Выбираем способ А или способ В.

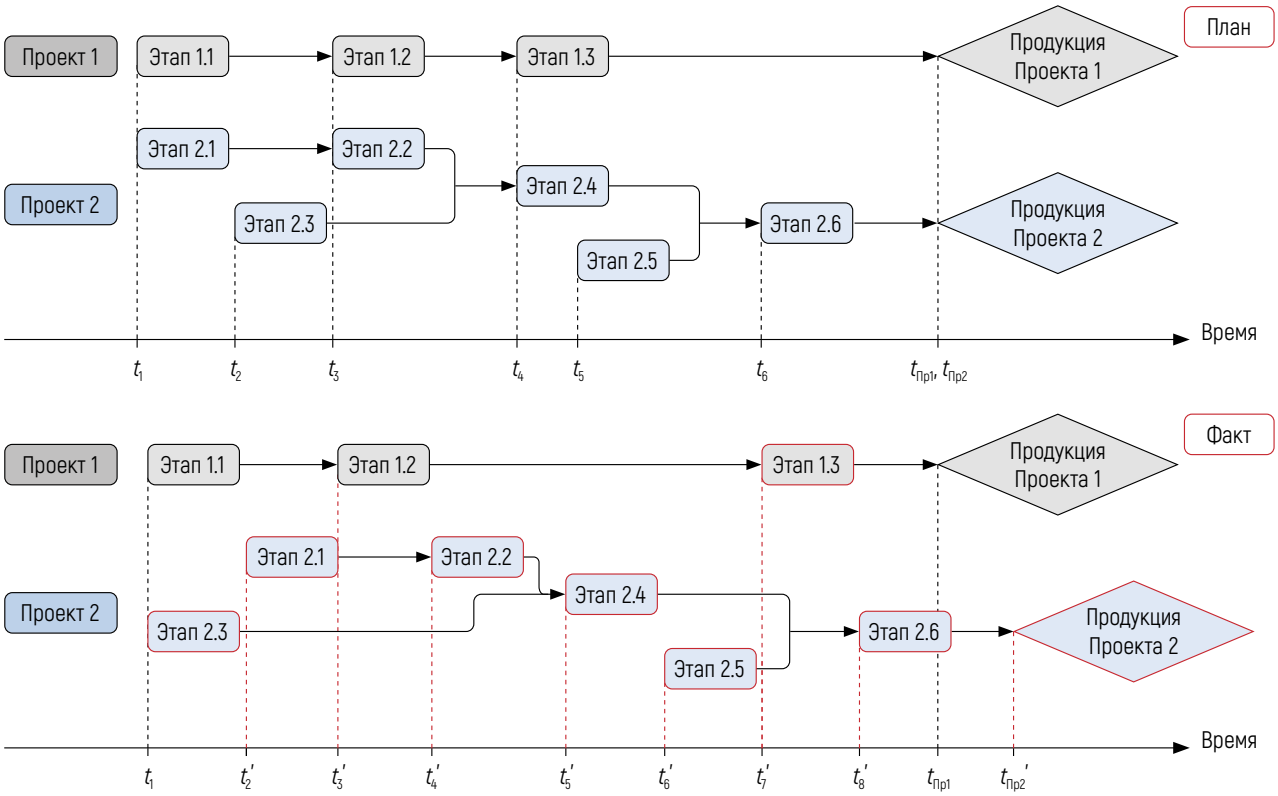


Рисунок 7 – Изменение последовательности выполнения этапов проектов

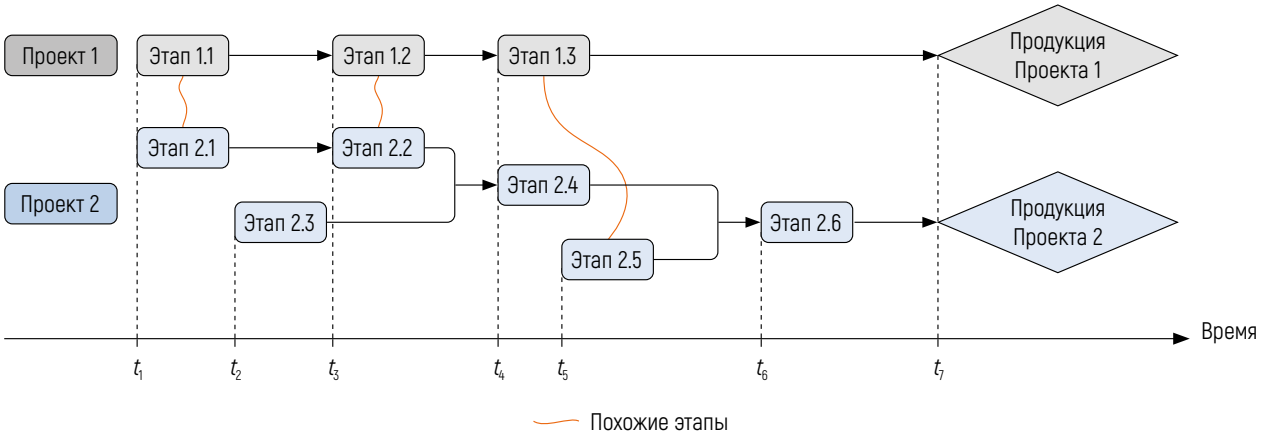


Рисунок 8 – Одновременное выполнение похожих этапов разных проектов

2.В. Задача организации приобретения дополнительных ресурсов.

Исходные данные: нет возможности перераспределить последовательность выполнения этапов параллельных проектов, причём оба проекта являются принципиально важными.

Задача: обеспечить оба проекта необходимыми ресурсами.

Решение/результат: приобретение дополнительных ресурсов для выполнения проектов.

Таким образом, концепцию СППР можно представить как структуру задач, приведённую на рисунке 9.

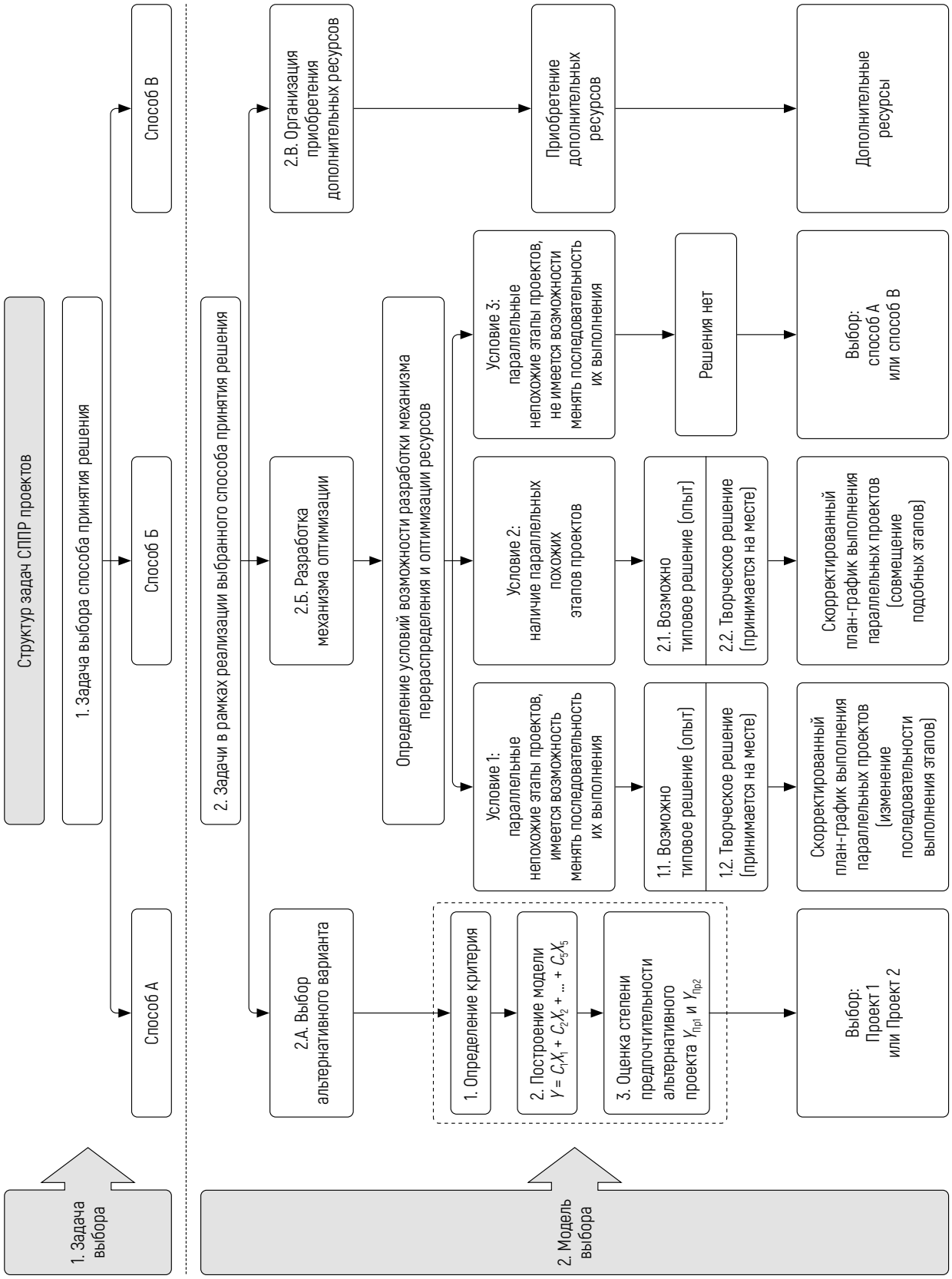


Рисунок 9 – Концепция СППР как структура задач

Заключение

Рассмотрена задача снижения рисков реализации программы «ЭкоМир» за счёт решения проблемы корректного выбора приоритетов перераспределения ресурсов между параллельными проектами в часто встречающихся форс-мажорных ситуациях.

В качестве инструмента решения проблемы обосновано применение методологии организационного проектирования сложных СУ, ключевой элемент которой – разработка эффективной СППР на всех этапах жизненного цикла проекта. Предложены механизмы адаптации методологии (принципы, подходы, инструменты) с учётом масштаба и специфических особенностей проекта.

Разработан оригинальный механизм реализации СППР как экспертной системы, в основу которой положена квалиметрическая модель, обеспечивающая максимальную достоверность экспертных оценок и, соответственно, корректность принимаемых управленческих действий.

Механизм рассматривает три типовые ситуации и связанные с ними задачи поддержки принятия решений по ликвидации дефицита ресурсов для реализации параллельных процессов в форс-мажорных обстоятельствах. Для каждой ситуации представлен алгоритм действий, гарантирующий корректное устранение возникшей проблемы.

В совокупности предложенный механизм СППР в отношении перераспределения ресурсов между параллельными проектами в организации, задействованной в мегапроекте, является типовым и может быть использован для компаний любого типа и профиля деятельности.

Список основных источников

1. *Юницкий, А.Э. Программа «ЭкоМир» / А.Э. Юницкий. – Минск, 2024. – 64 с.*
2. *Системы менеджмента качества. Требования = Сістэмы менеджменту якасці. Патрабаванні: СТБ ISO 9001-2015. – Взамен СТБ ISO 9001-2009; введ. 01.03.2016. – Минск: Госстандарт, 2019. – 32 с.*
3. *Менеджмент для достижения устойчивого успеха организации. Подход на основе менеджмента качества = Менеджмент для дасягнення ўстойлівага поспеху арганізацыі. Падыход на аснове менеджменту якасці: СТБ ISO 9004-2010. – Взамен СТБ ИСО 9004-2001; введ. 01.01.2011. – Минск: Госстандарт, 2010. – 52 с.*
4. *Репин, В.В. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов / В.В. Репин, В.Г. Елиферов. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2004. – 408 с., ил. – (Серия «Практический менеджмент»).*
5. *Калита, П. От процессов управления качеством – к целостной технологии непрерывного совершенствования организаций / П. Калита // Стандарты и качество. – 2001. – № 1. – С. 40–44.*
6. *Парфенов, И.И. Разработка методологии автоматизированного управления ситуациями в организационно-технических системах: дис. … д-ра техн. наук: 05.13.01 / Парфенов Игорь Иванович; Конструкторское бюро – 1. – М., 2004. – 227 л.*
7. *Син, Ю. Развитие бизнес-корпораций методами организационного проектирования / Ю. Син // Корпоративный менеджмент. – URL: https://www.cfin.ru/management/strategy/plan/bcorp_org.shtml (дата обращения: 05.05.2025).*
8. *Сухов, С.В. Системный подход к управлению коммерческим предприятием / С.В. Сухов // Менеджмент в России и за рубежом. – 2001. – № 6. – URL: https://www.mevriz.ru/articles/2001/6/968.html (дата обращения: 05.05.2025).*
9. *Никаноров, С.П. Характеристика и область применения метода концептуального проектирования систем организационного управления / С.П. Никаноров // Концептуальное проектирование систем организационного управления и его применение в капитальном строительстве: сб. науч. тр. / ЦНИИ экономики и упр. стр-вом. – М., 1989. – С. 8–29.*
10. *Серенков, П.С. Методы менеджмента качества. Методология организационного проектирования инженерной составляющей системы менеджмента качества / П.С. Серенков. – М.: ИНФРА-М; Минск: Новое знание, 2011. – 490 с.*
11. *Серенков, П.С. Методологические основы создания систем менеджмента качества с использованием подходов организационного проектирования сложных систем: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.02.23 / Серенков Павел Степанович; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2007. – 50 с.*
12. *Серенков, П.С. Концепция процессно-ориентированной модели локального контура системы сбора и анализа данных числовой природы / П.С. Серенков, В.М. Романчак, В.Л. Соломахо // Методы менеджмента качества. – 2008. – № 10. – С. 30–35.*
13. *Муравский, А.В. Интеллектуальные модели качественного анализа слабо формализованных временных процессов в системах поддержки принятия решений: дис. … канд.*

техн. наук: 05.13.17 / Муравский Александр Викторович; Ростов. гос. ун-т путей сообщения М-ва путей сообщения Рос. Федерации. – Ростов н/Д, 2003. – 223 л.

14. *Кабаев, С.И. Разработка децентрализованного механизма принятия стратегических решений на принципах делегирования ответственности: дис. … канд. экон. наук: 08.00.05 / Кабаев Сергей Иванович; М-во образования Рос. Федерации, Алтай. гос. ун-т. – Барнаул, 2002. – 181 л.*
15. *Гуринович, А.А. Особенности формирования систем менеджмента качества проектно-ориентированных организаций / А.А. Гуринович, П.С. Серенков // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2024. – №° 4. – С. 3–10.*
16. *Гуринович, А.А. Формирование горизонтальных коммуникаций СМК / А.А. Гуринович, П.С. Серенков, Е.А. Давыдова // Новые направления развития приборостроения: материалы 17-й междунар. науч.-техн. конф. молодых учёных и студентов, Минск, 19–21 апр. 2024 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: О.К. Гусев (пред. редкол.) [и др.]. – Минск, 2024. – С. 255.*

ЭКСПЕРТНЫЙ ДОКЛАД

УДК 001.891+629.7

Фундаментальные основы методологии научного эксперимента

Ю.М. Плескачевский
член-корреспондент
НАН Беларуси,
доктор технических наук,
профессор,
заслуженный деятель науки
Республики Беларусь

г. Гомель, Беларусь

Рассматриваются фундаментальные методологические принципы постановки и проведения научного эксперимента, который трактуется как диалог Человека с Природой. Успех исследований определяется корректностью формулировки поставленных вопросов и адекватностью экспериментальных факторов. Особое внимание уделяется необходимости начала проведения научной работы с чистого листа, а также недопустимости влияния неучтённых процессов и переменных.

Показана ограниченная применимость экстраполяции экспериментальных данных за пределы изученных областей и обозначены типичные ошибки, возникающие при таком подходе. Рассмотрена взаимосвязь прочностных характеристик с точностью измерений и обоснована важность увеличения объёма экспериментальных выборок для обеспечения однородности доверительных интервалов. Впервые отмечены закономерности поведения исследуемых систем при ударных воздействиях с точки зрения термодинамики. Проанализированы методологические особенности одно- и многофакторных экспериментов, а также риски, связанные с нарушением принципа аддитивности. Подтверждена необходимость комплексного учёта указанных положений при планировании, проведении и интерпретации экспериментов, особенно при исследовании и моделировании крупных и сложных динамических систем.

Сформулированные выводы имеют фундаментальное значение для повышения достоверности и корректности экспериментальных результатов.

Ключевые слова:
аддитивность факторов, доверительные интервалы, достоверность экспериментальных данных, методология исследования, постановка эксперимента, ударные воздействия, экстраполяция данных.

UDC 001.891+629.7

Fundamental Principles of Scientific Experiment Methodology

Y. Pleskachevsky
Corresponding Member
of the National Academy
of Sciences of Belarus,
Doctor of Engineering Sciences,
Professor, Honored Scientist
of the Republic of Belarus

Gomel, Belarus

The article discusses the fundamental methodological principles of designing and conducting scientific experiments, which are interpreted as a dialogue between Human and Nature. The success of research is determined by the correctness of the formulation of the questions posed and the adequacy of the experimental factors. Particular attention is given to the necessity of initiating scientific work from scratch, as well as to the inadmissibility of the influence of unaccounted processes and variables.

The paper demonstrates the limited applicability of extrapolating experimental data beyond the investigated domains and identifies typical errors associated with this approach. It examines the relationship between strength characteristics and measurement accuracy and substantiates the importance of increasing sample size to ensure the uniformity of confidence intervals. For the first time, the behavior patterns of the studied systems under impact loads are described from a thermodynamic perspective. The methodological features of single- and multifactor experiments are analyzed, along with the risks associated with violating the principle of additivity. The necessity of comprehensively accounting for these factors in the planning, execution, and interpretation of experiments – particularly in the study and modeling of large, complex dynamic systems – is confirmed.

The conclusions drawn are of fundamental importance for enhancing the reliability and accuracy of experimental results.

Keywords:
additivity of factors,
confidence intervals,
data extrapolation,
experimental design,
reliability of experimental data,
research methodology,
shock effects.

Введение

Изложению общей методологии и конкретных методов научного исследования, а также описанию соответствующего аппаратурного оснащения посвящено значительное количество монографий, учебников и учебных пособий, например [1, 2]. Однако существуют такие особенности, нюансы и тонкости научного эксперимента, которые, как правило, не отражены в профильных литературных источниках, но имеют фундаментальное значение для постановки и проведения экспериментального исследования, понимания его сущностной природы и получения достоверного результата. С этой позиции обращаем внимание на нижеследующее.

Эксперимент – это диалог Человека с Природой

С философской точки зрения любой эксперимент в области естественных наук можно трактовать как диалог Человека с Природой. Успех эксперимента зависит от корректности вопроса, поставленного Человеком перед Природой. При этом очевидно, что даже на очень грамотно сформулированный вопрос Природа не ответит предложением. Природа предложениями не говорит. В лучшем случае она ответит «да» или «нет», «хорошо» или «плохо», «больше» или «меньше» либо промолчит. Если Природа на заданный вопрос не отвечает, то он или не верный, или не по нужному адресу, или произнесён слишком тихо. Задача экспериментатора – выстроить цепь достаточно громких вопросов, на каждый из которых существует только два ответа: положительный («да») или отрицательный («нет»).

Например, если перед нами ковш с расплавом железа и стоит задача создать нержавеющую сталь, то, добавив последовательно в расплав по 1 % хрома, никеля и титана, мы получим ответ «да» только в отношении хрома, для которого оптимальное содержание в нержавеющей стали составляет именно 1 %. В отношении никеля и титана Природа промолчит, поскольку вопрос задан слишком тихо. При постепенном увеличении содержания никеля и титана ответ будет всё громче и громче (по критериям коррозионной стойкости нержавеющей стали), пока не будут достигнуты 18 % для никеля и 10 % для титана. Если продолжать увеличивать содержание хрома выше 1 %, никеля – более 18 % и титана – сверх 10 %, ответ станет звучать всё тише и тише. Таким образом, экспериментатор установит оптимальное содержание легирующих металлов и создаст нержавеющую сталь марки 1Х18Н10Т.

Эксперимент с чистого листа

При экспериментальном исследовании главным условием считается начало проведения научной работы с чистого листа. Для того чтобы проанализировать явление, процесс или фактор, надо прежде всего полностью исключить это явление, процесс или фактор. Если стоит задача исследовать, например, кристаллизацию, то нужно быть уверенным, что до начала эксперимента в подлежащем изучению образце материала не протекает спонтанная (холодная) кристаллизация.

Особенно важно при механических испытаниях конструкционных материалов учитывать возможное наличие остаточных внутренних напряжений. При определении предела прочности материала на растяжение в случаях наличия в материале сжимающих напряжений результаты будут завышены, а при растягивающих – занижены. Пользоваться такими данными недопустимо. Перед началом эксперимента надо в исследуемом образце материала создать термосиловые условия, при которых произойдёт полная релаксация остаточных напряжений.

Осторожно с экстраполяцией

Рискованно заниматься экстраполяцией экспериментальных данных за пределы достоверно изученных областей, даже на единицы процентов от величины данного показателя.

Наиболее характерные ошибки экстраполяции приведены на рисунке 1.

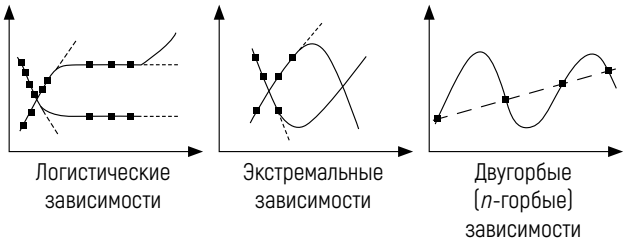


Рисунок 1 – Наиболее характерные ошибки экстраполяции

Всё многообразие экспериментальных зависимостей можно свести к трём типам: логистические (возрастающие или ниспадающие), экстремальные (с минимумом или максимумом), двугорбые (*n*-горбые). В этих трёх случаях экстраполяция кривых за экспериментально изученные пределы (пунктирные линии) приводит к грубым ошибкам.

Прочность и точность

Из личного опыта экспериментальных исследований деформационно-прочностных характеристик конструкционных композиционных материалов, а также прочности адгезионных соединений полимер – металл [3] отметим, что с ростом регистрируемой прочности, например в зависимости от температуры формирования композита или адгезионного соединения, увеличивается точность определения значений прочности (рисунок 2) [4].

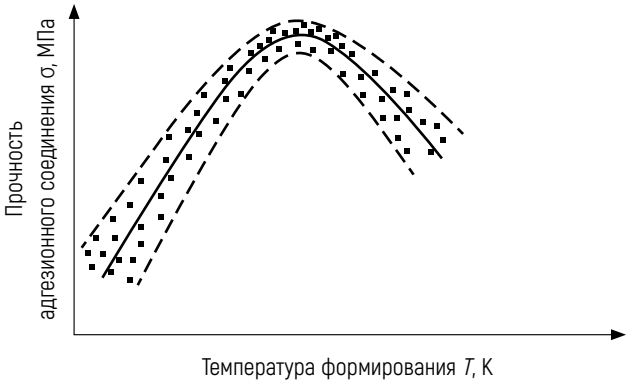


Рисунок 2 – Зависимость точности от прочности

Следовательно, с ростом прочности уменьшаются доверительные границы (интервалы) погрешности измерений [4]. Иными словами, при одинаковом количестве экспериментов на одну точку погрешность измерений будет возрастать с падением значений прочности. Для того чтобы выровнять доверительные границы по всей экспериментальной кривой, число экспериментов на одну точку должно расти обратно пропорционально регистрируемым значениям прочности. Это правило никто и никогда не соблюдает. Доверительные границы (интервалы) погрешности измерений не должны зависеть от величины измеряемого параметра. Выравнивание погрешности и её минимизация достигаются соответствующим увеличением количества экспериментов на одну точку регистрируемой зависимости. Только так можно добиться стабильности точности измерений во всём диапазоне значений изучаемого параметра.

Термодинамика ударных воздействий

Опасны своей непредсказуемостью по последствиям ударные температурные, механические и иной природы воздействия. Великий учёный М.В. Ломоносов утверждал, что Природа состоит в действии и противодействии, а движущееся тело при ударе в покоящееся производит в последнем изменения, как и покоящееся в движущемся [5]. Всё усложняется, если фронт воздействия строго прямоугольный. При разложении прямоугольного импульса в ряд Фурье получаем непрерывный спектр частот, а при использовании интеграла Фурье – сплошной спектр. Это значит, что при ударном воздействии система подвергается воздействию ударных амплитуд во всём диапазоне – от сверхмалых до бесконечно больших частот. Реакция системы при этом непредсказуема, но может быть описана в терминах термодинамики.

Основные этапы развития термодинамического подхода с точки зрения действия и противодействия представлены на рисунке 3, а с точки зрения развития нестационарности реакций исследуемого объекта при ударных воздействиях – на рисунке 4.

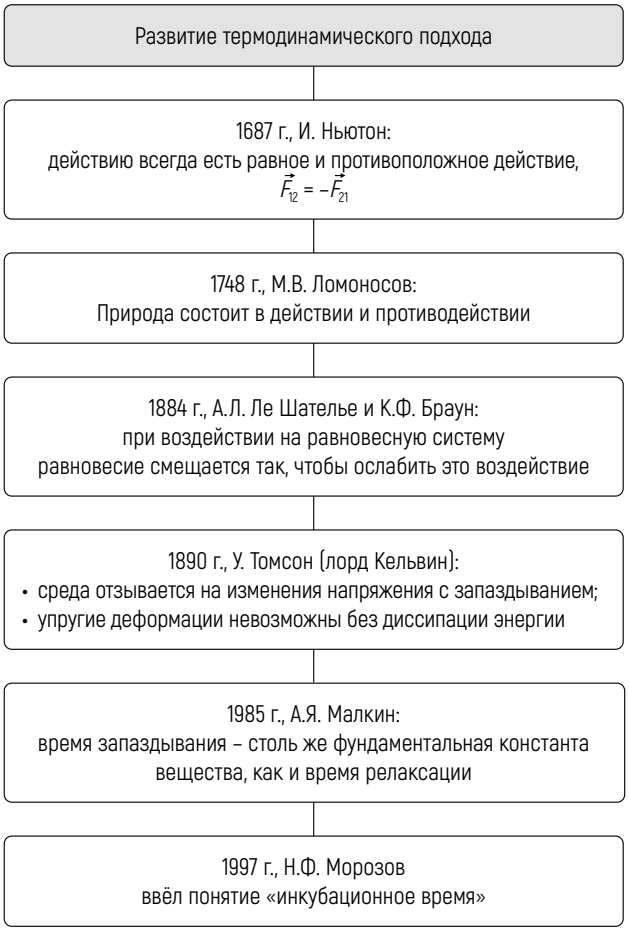


Рисунок 3 – Развитие концепции действия (противодействия) с точки зрения термодинамики

Проявления нестационарности реакций исследуемого объекта при ударных воздействиях

1971 г., В.А. Белый., Н.И. Егоренков, Ю.М. Плескачевский: зависимость типа разрушения адгезионного соединения металл – полимер – металл от скорости деформирования

1983 г., Ю.М. Плескачевский, Н.И. Синюк, А.В. Лашкевич: начиная с сотых долей секунды теплового удара значения коэффициента температуропроводности существенно превышают табличные

1985 г., В.А. Балакин: в начальные моменты нагрева тел значения коэффициентов температуропроводности выше, чем при стационарных режимах

Электродинамика:
- скачки тока и напряжения при импульсной их подаче на ёмкости и индуктивности соответственно;
- пусковой ток

Физика полимеров: механическое стеклование аморфных полимеров при ударном воздействии (скорость деформирования выше времени релаксации)

Рисунок 4 – Факты экспериментального подтверждения нестационарности при ударных воздействиях

Особо выделим фундаментальный термодинамический принцип Ле Шателье – Брауна [6], одна из наиболее общих формулировок которого такова: если система, находящаяся в состоянии равновесия, подвергается воздействию какого-либо фактора, то равновесие в системе смещается так, чтобы действие этого фактора ослабить.

Основываясь на результатах наших исследований [7, 8] и данных рисунка 4, мы предложили развить принцип Ле Шателье – Брауна на ударные воздействия импульсами с прямоугольным фронтом и сформулировать его следующим образом: при ударном характере воздействия на систему, находящуюся в состоянии устойчивого равновесия, значения факторов, характеризующих смещение равновесия в направлении, при котором эффект внешнего воздействия ослабляется, превышают значения, характерные для последующего нового устойчивого состояния. По существу, это новый физический закон, приведённый нами в термодинамической формулировке и неизбежно проявляющийся при ударных воздействиях, чему есть реальные обобщённые нами экспериментальные подтверждения (рисунок 4).

Таким образом, при проведении экспериментальных исследований необходимо избегать воздействий с прямоугольным фронтом импульса, при невозможности этого – учитывать неизбежную нестационарность реакции системы, особенно в первые мгновения нарастания фронта импульса.

Одно- и многофакторные эксперименты

Наиболее трудоёмки многофакторные эксперименты, требующие значительных временных и материальных затрат. Этапы однофакторного эксперимента приведены в верхней части рисунка 5, последовательность действий при многофакторном планировании эксперимента – в его нижней части.

Многофакторные эксперименты

Этапы планирования
1. Установление цели.
2. Уточнение условий проведения.
3. Выбор входных и выходных параметров.
4. Выбор математической модели.
5. Установление требуемой точности результатов.
6. Выбор критерия оптимальности.
7. Проверка статистических предпосылок для получения данных.
8. Объяснение полученных результатов и формулировка рекомендаций

Факторное планирование
1. Выбор влияющих факторов и параметров оптимизации.
2. Выбор уровней варьирования каждого фактора (мин., средн., макс.).
3. Составление матрицы планирования.
4. Составление уравнения регрессии.
5. Установление влияющих факторов.
6. Проверка адекватности модели по *t*-критерию Стьюдента и *F*-критерию Фишера.
7. Определение поверхности отклика параметров оптимизации.
8. Переход от условных параметров к физическим

Рисунок 5 – Этапы проведения экспериментов в области естественных наук

Методология многофакторного планирования позволяет заметно сократить по времени и затратам эксперимент, ставящий целью изучить влияние одновременно множества факторов на тот или иной исследуемый и оптимизируемый по заданным критериям параметр (прочность, стоимость, экологичность и др.). Привлекательность данной методологии в том, что выбор уровней варьирования каждого фактора может осуществляться на основании как собственных, так и литературных данных. При этом достаточными для определения поверхности отклика считаются только максимальное и минимальное значения, иногда плюс среднее. Однако такой подход чреват ошибками в определении истинности поверхности отклика выбранного параметра оптимизации, о чём речь пойдёт в следующем разделе.

Подводные камни

В ходе проведения естественно-научного эксперимента в изучаемом объекте могут начать протекать процессы, не учтённые при подготовке исследования и существенно, даже непредсказуемо, влияющие на результат. Эти подводные камни наиболее опасны в работах материаловедческого характера, особенно реализуемых по методологии многофакторного планирования, основанной на постулате аддитивности. Если при составлении матрицы планирования использованы данные, полученные раздельно для каждого анализируемого фактора в разных экспериментах, то нарушение принципа аддитивности ($2 + 2 \neq 4$) практически неизбежно. При этом вводимые в матрицу компоненты могут (каждый специфически) не только влиять на структуру и свойства матрицы, но и взаимодействовать между собой, что может вызвать включение механизмов катализа ($2 + 2 > 4$), ингибирования ($2 + 2 < 4$), самоорганизации, синергетики.

Заключение

Всё вышеизложенное должно учитываться при планировании естественно-научного эксперимента, его проведении, обсуждении результатов и формулировании обоснованных выводов и рекомендаций. Это особенно важно при исследовании и моделировании больших и сложных динамических объектов, например общепланетарного транспортного средства и космического индустриального ожерелья «Орбита». Такие объекты превосходят размеры планеты и состоят из миллиардов деталей, узлов и элементов, которые изготовлены из тысяч различных материалов (общей массой в миллионы тонн) и движутся относительно друг друга со скоростями, превышающими первую космическую скорость [9, 10].

Список основных источников

1. *Михайлов, М.И. Основы научных исследований и инновационной деятельности: учеб. пособие / М.И. Михайлов. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2017. – 399 с.*
2. *Метрология и методы научных исследований: учеб. пособие / И.Ю. Ухарцева, Е.А. Цветкова, Ж.В. Кадолич, С.В. Зотов. – Минск: РИВШ, 2022. – 275 с.: ил.*
3. *Белый, В.А. Адгезия полимеров к металлам / В.А. Белый, Н.И. Егоренков, Ю.М. Плескачевский. – Минск: Наука и техника, 1971. – 288 с.*
4. *Основные термины метрологии: русско-белорусский словарь-справочник = Асноўныя тэрміны метралогіі: руска-беларускі слоўнік-даведнік / Ю.М. Плескачевский, Н.А. Жагора, В.П. Селькин [и др.]; под общ. ред. Ю.М. Плескачевского. – Минск: БелГИМ, 2007. – 255 с.*
5. *Ломоносов, М.В. Избранные произведения: в 2 т. / М.В. Ломоносов. – М.: Наука, 1986. – Т. 1: Естественные науки и философия. – 536 с.*
6. *Леенсон, И. Принцип Ле Шателье – не только в химии / И. Леенсон // Химия и жизнь – XXI век. – 1999. – № 7. – С. 58–60.*
7. *Плескачевский, Ю.М. Развитие термодинамического принципа Ле Шателье – Брауна / Ю.М. Плескачевский // Укрощение цунами: Гипотезы. Идеи. Мысли. Факты / Ю.М. Плескачевский. – Гомель: БелГУТ, 2018. – С. 12–14.*
8. *Старовойтов, Э.И. Колебания трёхслойной пластины, вызванные тепловым ударом и импульсной нагрузкой / Э.И. Старовойтов, Ю.М. Плескачевский, Д.В. Леоненко // Инженерно-физический журнал. – 2025. – Т. 98, № 3. – С. 764–772.*
9. *Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А.Э. Юницкий. – Силакрогс: ПНБ принт, 2019. – 576 с.*
10. *Юницкий, А.Э. Инженерия. Мир как инженерный проект / Анатолий Юницкий. – Минск: СтройМедиаПроект, 2023. – 320 с.*

Решение VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса

12–13 сентября 2025 г. в г. Марьина Горка (Беларусь) состоялась VIII Глобальная конференция по индустриализации ближнего космоса.

Программа мероприятия включала пленарное заседание, стенд-сессию, работу секций, дискуссии, а также выставочную экспозицию и демонстрацию инновационных космических, инфраструктурных, транспортно-логистических, энергетических, биосферных, социально-экономических и агробиотехнологий. Вниманию участников было представлено 44 доклада.

Конференция стала знаковым международным событием в сфере широкомасштабного индустриального освоения космоса. Цель форума – обобщение результатов научно-исследовательских и научно-практических работ, осуществляемых в научных организациях, конструкторских бюро и инжиниринговых компаниях, а также выполняемых отдельными учёными и энтузиастами по следующим направлениям:

- решение глобальных биосферных проблем современности геокосмическими средствами;
- перспективы технологического освоения ближнего космоса в рамках геокосмической программы uSpace под девизом «Земля – для жизни. Космос – для индустрии»;
- организация безопасных широкомасштабных грузопассажирских потоков по маршруту «Земля – Ближний космос – Земля» с целью развития космической индустрии в интересах земной цивилизации;
- особенности проектирования, поиск решений биологического и экологического характера для устойчивого функционирования земной биосферы, сохранения биоразнообразия на нашей планете и освоения труднодоступных территорий с неблагоприятными условиями для жизни человека;
- специфика социальной организации линейных городов uCity;
- особенности международных и межкультурных отношений и создания международных объединений для реализации программы uSpace;
- проблемные аспекты использования социальных медиа при осуществлении программы uSpace и поиск эффективных решений;
- развитие технологии производства растительной продукции в рамках проекта «ЭкоКосмоДом» и на орбитальных станциях, предназначенных для длительного проживания человека в космосе;

• научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы по созданию самонесущего геокосмического летательного аппарата – общепланетарного транспортного средства, его наземной и орбитальной инфраструктуры: транспортной, энергетической и информационной.

По итогам VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса организационным комитетом и участниками принят ряд решений.

1. Дать высокую оценку научному и научно-техническому уровню представленных докладов.

2. Отметить чрезвычайную общечеловеческую значимость программы широкомасштабного освоения ближнего космоса и перезагрузки земной индустрии на биосферный вектор цивилизационного развития.

3. Подчеркнуть важность глобального геокосмического проекта по созданию общепланетарного транспортного средства как единственно возможного с инженерной точки зрения, следовательно, ключевого транспортно-логистического решения для индустриального освоения ближнего космоса.

4. Учитывая масштабность представленных на конференции работ, отметить первостепенное значение и очевидную актуальность развития сотрудничества между странами, международными организациями, ведущими мировыми компаниями, научно-исследовательскими учреждениями и университетами с целью осуществления программы uSpace.

5. Реализовать в проектах все положения, указанные в письме Государственного секретаря Союзного государства об укреплении дружественных отношений, расширении областей содействия и сотрудничества.

6. Продолжить активное взаимодействие между всеми участниками и партнёрами настоящей конференции.

7. Приложить все усилия для создания совместных проектов и развития программы «ЭкоМир» с целью комплексного решения насущных цивилизационных проблем современности: инфраструктурных, ресурсных, энергетических, продовольственных, экологических, социально-экономических, демографических, экономико-политических, иных.

8. Для привлечения широкого круга исследователей, занимающихся проблематикой индустриального освоения ближнего космоса, регулярно участвовать в профильных международных мероприятиях, проводить презентации и представлять научные доклады о разработках и достижениях в рамках реализации программы uSpace.

9. Издать сборник научных трудов конференции и обеспечить его распространение по ведущим библиотекам, электронным площадкам, научным порталам и каталогам мира. Участникам, чьи работы будут опубликованы, оформить их в виде научных статей в соответствии с предъявляемыми требованиями.

10. В целях выхода на новый уровень общественной известности и поддержки, использования самых эффективных путей продвижения и реализации геокосмической программы uSpace провести в 2026 г. IX Глобальную конференцию по индустриализации ближнего космоса. Для этого пригласить к диалогу стратегических партнёров, заинтересованных в скорейшей индустриализации ближнего космоса, обеспечить участие ключевых международных организаций, ведущих научно-исследовательских центров, лидеров наций и глав государств.

Организационный комитет конференции выражает признательность всем участникам, докладчикам, гостям, а также организациям и их представителям, благодаря которым мероприятие состоялось, и в первую очередь президенту группы компаний Юницкого, основному инвестору программы uSpace и настоящей конференции – Анатолию Эдуардовичу Юницкому, финансовому партнёру мероприятия – строительной компании «МоноБилд», партнёрам по гостеприимству – Крестьянскому (фермерскому) хозяйству «Юницкого» и экопарку «Акварель», участникам выставочной экспозиции – компаниям UVR, UNIMO, проекту uTerra, а также инжиниринговой компании «Струнные технологии» за неоценимый вклад в организационную и научную составляющую форума.

За содействие в развитии программы uSpace приносим благодарность Национальной академии наук Беларуси и отдельно управлению аэрокосмической деятельности в лице начальника Петра Александровича Витязя и ведущего специалиста Ирины Александровны Казачок, Центру международного промышленного сотрудничества ЮНИДО в Российской Федерации в лице руководителя Игоря Владимировича Кожина и проектного администратора Ивана Николаевича Серёгина, председателю организационного комитета Международного муниципального форума БРИКС Михаилу Сергеевичу Черепанову, а также Российской академии наук, госкорпорации «Роскосмос», Белорусскому государственному университету транспорта и Сибирскому государственному индустриальному университету.

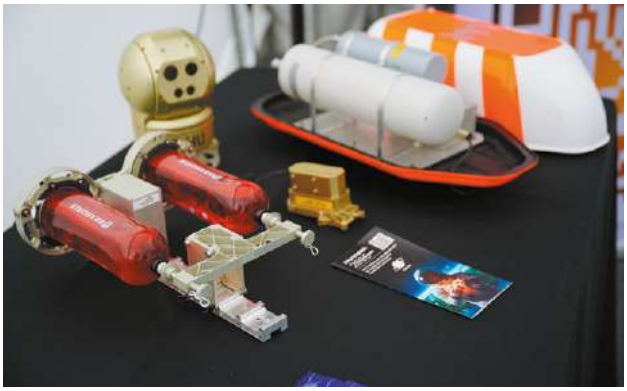
Особую признательность за участие в конференции, поддержку научного мероприятия и тесное сотрудничество

выражаем Постоянному Комитету и Государственному секретарю Союзного государства Сергею Юрьевичу Глазьеву. Благодаря высокому профессионализму руководства Союзного государства и комплексному подходу к решению стратегических задач интеграции и развития экономик России и Беларуси уже дан старт ряду совместных проектов, призванных стать основой устойчивого роста и укрепления лидерских позиций данного межгосударственного объединения на мировой арене. В рамках настоящего форума между Государственным секретарём Союзного государства и председателем организационного комитета VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса состоялся торжественный обмен встречными письмами об укреплении дружественных отношений, расширении областей содействия и сотрудничества, что послужит фундаментом более системного и эффективного взаимодействия на благо процветания человеческой цивилизации в нашем общем с миллионами видов других живых организмов доме – в биосфере планеты Земля.

Организационный комитет VIII Глобальной конференции
по индустриализации ближнего космоса
13.09.2025, г. Марьина Горка

2025
VIII Глобальная конференция
по индустриализации
ближнего космоса
Геокосмические и геотехнические науки
технологии, материалы и ресурсы
2025
VIII Global Conference
on Near Space Industrialization
VIII

VIII
Глобальная конференция
по индустриализации ближнего космоса
Global Conference on Near Space Industrialization
uSPACE
СОЮЗНОЕ ГОСУДАРСТВО
САЮЗНАЯ ДЗЯРЖАВА



Глоссарий: термины и определения

Аббревиатура **uST** выступает в качестве центрального бренда группы компаний Юницкого; объединяет в себе наименования технологии Струнного транспорта Юницкого (Unitsky String Technologies / Unitsky String Transport – uST), транспортно-инфраструктурных комплексов **uST** (uST transport and infrastructure complex), транспортно-инфраструктурных решений **uST** (uST transport and infrastructure solutions) и головной инжиниринговой компании ЗАО «Струнные технологии» (Unitsky String Technologies Inc. – **UST Inc.**).

Активная система защиты (АСЗ) – генератор электростатического поля, при прохождении которого отрицательно заряженные обломки космического мусора создают в нём резонансные колебания.

Биологическое равновесие – сохранение в течение длительного времени динамической стабильности природных комплексов (биогеоценозов), т. е. относительный баланс устойчивости видового состава живых организмов, их численности и продуктивности.

Биоразнообразие – природное разнообразие жизни во всех её проявлениях, а также показатель сложности биологической системы, разнокачественности её живых компонентов. Биоразнообразие рассматривают на иерархических уровнях организации жизни, среди которых стоит выделить основные: молекулярно-генетический, организменно-видовой, биогеоценотический и биосферный.

Биотопливо – различные виды горючих продуктов, полученных из растительного сырья, главными преимуществами которых являются возобновляемость и аккумулирование солнечной энергии, поступающей на Землю.

Взлётно-посадочная эстакада общепланетарного транспортного средства (uWay) – взлётно-посадочный, энергетический и коммуникационный комплекс эстакадного типа для геокосмических перевозок, размещённый вдоль экватора и совмещённый с линейным экопоселением нового поколения.

Геокосмическая программа uSpace – программа безракетного освоения ближнего космоса с помощью общепланетарного транспортного средства (ОТС), реализация которой обеспечит сохранение земной биосферы путём выноса индустрии (техносферы) за пределы планеты Земля (за пределы земной биосферы).

Искусственная атмосфера – специально подобранная смесь газов, которая обеспечивает нормальное дыхание и газообмен у живых организмов, включая человека, находящихся в условиях замкнутой (закрытой) экосистемы; по качеству не уступает земной атмосфере. Газовая составляющая пространства ЭкоКосмоДома (ЭКД) – искусственная атмосфера.

Космическая солнечная электростанция (КСЭС) – орбитальная солнечная электростанция, использующая энергию Солнца; обеспечивает энергонезависимость и биосферную экологическую безопасность космического индустриального ожерелья «Орбита» (КИО «Орбита»).

Космический вектор индустриализации – глобальное перевооружение земной техносферы с целью устранения её антропогенного угнетающего воздействия на биосферу Земли за счёт перемещения экологически вредных, энерго- и ресурсоёмких отраслей и предприятий в космос на низкие околоземные орбиты. Космический вектор индустриализации также предполагает модернизацию части индустрии, оставленной на Земле и функционирующей в биосфере, на основе экоориентированных технологий.

Космическое индустриальное ожерелье «Орбита» (КИО «Орбита») (англ. – Industrial Space Necklace "Orbit" – ISN "Orbit") – обслуживающий земное человечество многоорбитальный транспортно-инфраструктурный и индустриально-жилой комплекс, охватывающий планету в плоскости экватора, являющийся функциональным аналогом земного экваториального линейного города (ЭЛГ), размещённым в космосе, а также плацдармом для защиты от космических угроз (в том числе метеоритных) и платформой для экспансии земной цивилизации в дальний космос.

Линейный город uCity – пешеходное городское поселение кластерного типа, поверхность земли в котором предназначена для людей, животных и зелёных насаждений; застройка жилых, административных, индустриальных и многофункциональных кластеров реализуется с использованием экоориентированных технологий EcoHouse; обеспечение электроэнергией и теплом осуществляется в соответствии с технологией uEnergy; снабжение продуктами питания взаимосвязано с технологией органического земледелия uGreen; транспортные, энергетические и информационные коммуникации размещены над землёй на втором уровне (эстакадное исполнение) согласно технологии uST. Линейные города uCity отличают отсутствие антропогенного угнетающего воздействия на биосферу Земли, высокая эффективность городского хозяйствования и его автономность, а также достойный уровень качества жизни и условий труда для каждого жителя.

Мировой Банк плодородных почв и почвенных организмов uTerra (мировой Банк почв uTerra) – уникальный научно-производственный объект, обеспечивающий высокую концентрацию ассоциаций тысяч видов агрономически ценных аэробных и анаэробных микроорганизмов, которые служат биологической основой для продукции линейки uTerra. Представляет собой коллекцию образцов плодородных почв, не тронутых пахотой и обработкой химическими удобрениями, собираемую и постоянно пополняемую с 2019 г. Природные материалы получены из более чем 200 регионов мира, охватывающих различные почвенно-климатические зоны всех континентов, кроме Антарктиды. Мировой Банк почв uTerra является единственным объектом такого типа в мировой практике агробиотехнологий. Создан А.Э. Юницким в рамках программы «ЭкоМир» и расположен на территории Крестьянского (фермерского) хозяйства «Юницкого» (КФХ «Юницкого») в г. Марьина Горка (Беларусь).

Общепланетарное транспортное средство (ОТС) (англ. – General Planetary Vehicle – GPV) – геокосмический самонесущий летательный аппарат многоразового использования для безракетного индустриального освоения ближнего космоса, выполненный в виде опоясывающего Землю в экваториальной плоскости тора; обеспечивающий индустриальные грузо- и пассажиропотоки (миллионы тонн грузов и миллионы пассажиров в год) с Земли на околоземные экваториальные орбиты и обратно; основанный на единственно возможной (с позиций физики) экологически чистой и с минимальными энергозатратами геокосмической транспортной технологии, использующей только внутренние силы системы (летательного аппарата) и электрическую энергию.

Пищевая солнечная биоэнергетика (ПСБЭ) – энергетика, основанная на комплексном потреблении и переработке биомассы растений, впитавших энергию Солнца, для получения биотоплива, корма для животных и пищи для человека.

Реликтовая солнечная биоэнергетика (РСБЭ) – энергетика, основанная на применении ископаемых бурых углей и горючих сланцев, для получения чистой энергии и одновременного образования живого гумуса, необходимого для восстановления плодородия различных типов почв.

Технологическая платформа «Струнные технологии Юницкого» (uST) (англ. – Unitsky String Technologies – uST) – строительство (вдоль линейных городов uCity) нового вида транспортно-инфраструктурной сети uNet, создаваемой на основе предварительно напряжённых (струнных) конструкций Юницкого. Предназначена для обеспечения всех необходимых коммуникационных связей между объектами (и континентами) на Земле; между объектами в ближнем космосе, движущимися по круговым экваториальным орбитам; между объектами на Земле и размещёнными в ближнем космосе.

Технологическая платформа «ЭкоКосмоДом» (ЭКД) (англ. – EcoCosmoHouse – ECH) – строительство в космосе сооружений с внутренним обитаемым пространством, изолированным от внешней агрессивной космической среды. В ЭКД создана замкнутая экосистема земного типа, включающая искусственно полученную гравитацию, живую плодородную почву, флору и фауну (в том числе микрофлору и микрофауну), атмосферу с регулируемыми параметрами (температура, влажность и др.) для неограниченно длительного, автономного, экокомфортного проживания и деятельности как отдельных людей и их групп, так и многотысячных поселений на экваториальных орбитах планеты, а также в открытом ближнем и дальнем космосе.

Технологическая платформа EcoHouse – экоориентированное строительство на Земле жилых и производственных зданий и сооружений с открытым для внешней природной (биосферной) среды придомовым пространством, заполненным естественной и культурной (органическое

земледелие) экосистемами, в которых атмосферные, почвенные и водные параметры регулируются земной природой. Почва из-под зданий при их строительстве переносится на крыши и этажи, затем обогащается живым гумусом. Озеленение проходит сообразно принципу: любое строительство на планете – это увеличение площади плодородных почв и повышение их плодородия.

Технологическая платформа uEnergy – генерация «зелёной» электрической и тепловой энергии с использованием:

- специально оборудованных теплоэлектростанций для экологически чистого сжигания бурых углей, сланцев, торфа и другого сырья органического происхождения с целью выработки живого плодородного гумуса из отходов их горения;
- возобновляемых источников энергии – энергии Солнца на Земле и в космосе, а также энергии ветра и морских течений;
- пары «водород – кислород» в качестве топливного аккумулятора для решения задач оптимизации энергетической отрасли планеты и космических перевозок.

Технологическая платформа uGreen – органическое земледелие в новой логике воссоздания и интенсификации природных биосферных процессов путём прямого заимствования и использования естественных природных почвенных экосистем со своими микрофлорой, микрофауной и биогеоценозом, а также в логике полного отказа от применения синтетических химикатов (удобрения, средства защиты растений и др.), технологий генной модификации и других элементов традиционного интенсивного земледелия.

Транспортно-инфраструктурная сеть uNet – международная сеть транспортных, энергетических и информационных коммуникаций, созданная на базе транспортно-инфраструктурных решений uST вдоль линейных городов uCity.

Устойчивое развитие – «удовлетворение потребностей нынешнего времени, не подвергая угрозе возможность последующих поколений удовлетворять свои потребности». Понятие сформулировано Международной комиссией по окружающей среде и развитию при ООН и положено в основу целей и принципов деятельности ООН.

Центр испытаний и сертификации uSky – научно-производственный кластер транспортно-инфраструктурных решений uST, построенный в Объединённых Арабских Эмиратах (г. Шарджа).

Цивилизационная техногенная развилка – стадия развития земной техносферы, в момент достижения которой техногенная человеческая цивилизация оказывается перед исторически важным выбором одного из двух взаимоисключающих сценариев действий:

1) земная цивилизация продолжает развивать традиционный техногенный вектор, ограничиваясь только размерами и ресурсами планеты. При этом потребление ресурсов кардинально не меняется, так как мировая экономика опирается на морально устаревшие и ресурсоёмкие технологии (в первую очередь – транспортно-логистические технологии столетней давности). Как следствие, точка невозврата от деградации, угасания и гибели человеческой цивилизации наступит примерно через два поколения (в третьей четверти XXI в.);

2) начало индустриализации ближнего космоса, получение доступа к его неограниченным ресурсам, бесконечным пространству, веществу и энергии, а также к новым технологическим ресурсам: невесомости, глубокому вакууму, технологической чистоте (без пыли и микроорганизмов) и космическим излучениям. Обязательное требование: используемые на планете неэффективные транспортно-инфраструктурные технологии, энергетика, среда обитания (города), инфраструктура и сельское хозяйство, представляющие наибольшую угрозу для земной биосферы, должны быть замещены более совершенными коммуникациями и экоориентированными технологиями.

Экваториальный линейный город (ЭЛГ) (англ. – Equatorial Linear City – ELC) – земной компонент геокосмического транспортно-коммуникационного комплекса, на территории которого размещена взлётно-посадочная эстакада ОТС со всей инфраструктурой, необходимой для осуществления полётов ОТС и обслуживания глобальных геокосмических грузо- и пассажиропотоков. Представляет собой гармонично вписанные в природную среду сухопутных и океанических участков планеты поселения кластерного типа, соединённые трассами uST и размещённые на полосе вдоль экватора.

ЭкоКосмоДом для цивилизационной панспермии (ЭКД-Ковчег) (англ. – EcoCosmoHouse for civilizational panspermia – ECH-Arc) – космическое сооружение

с биосферной замкнутой экосистемой, предназначенное для межзвёздных перелётов. Имеет форму тела вращения – веретена длиной 500–2000 м и диаметром 200–500 м, способно принять на хранение земную жизнь, включая экипаж численностью 1000–10 000 человек, чтобы перенести её на экзопланеты. ЭКД-Ковчег не только представляет собой земную биосферу в миниатюре, но и является сложнейшим автономно существующим в течение тысяч лет летательным аппаратом со своей энергетикой, двигателями, запасами топлива и исчерпаемых ресурсов (не участвующих в биосферном круговороте), инженерными коммуникациями, ремонтной базой, жилым и производственным фондом, агротехникой, агро- и аквакультурами, флорой, фауной и плодородной почвой, а также социумом с детским садом, школой и университетом, лечебным заведением, рабочими местами с сотней специальностей и др.

ЭкоКосмоДом на планете Земля (ЭКД-Земля) (англ. – EcoCosmoHouse on planet Earth – ECH-Earth) – земное сооружение, предназначенное для автономного и неограниченно длительного проживания человеческого поселения расчётной численности. Во внутреннем замкнутом пространстве ЭКД-Земля поддерживаются условия для развития экосистем, имеется совокупность необходимых для этого свойств биосферы планеты, а также моделируются дополнительные технологические процессы, гарантированно обеспечивающие потребности человека для существования (параметры атмосферы и среды обитания, пищевые ресурсы и др.). ЭКД-Земля является земной биосферной моделью ЭКД в части создания и организации внутреннего пространства и всех соответствующих составляющих (биосфера, технологии, взаимосвязи процессов и др.) с замкнутым круговоротом вещества (живого и минерального), энергии и информации.

ЭкоМир – программа, предусматривающая развитие экоориентированных биосферных технологий, направленных на трансформацию основных сфер земной деятельности человечества: промышленности, инфраструктуры, энергетики, транспорта, сельского хозяйства. Предполагает вынесение вредной части земной индустрии в ближний космос с целью обеспечения равновесия в совершенном мире, представленном триединством БиоМира, ТехноМира и ХомоМира, которые в совокупности образуют комплекс оптимальных условий для устойчивого роста и дальнейшего развития земной техногенной цивилизации в космическом направлении.

БиоМир – восстановленная и сбалансированная планетарная, открытая в космос биосферная экосистема, которая более не испытывает антропогенного угнетающего воздействия техносферы Земли и продолжает развиваться по законам эволюционно сложившейся земной природы. Включает:

- естественные и культурные (органическое земледелие) экосистемы на суше планеты, в том числе водные (озёра, реки и др.);
- океаническую, морскую и атмосферную экосистемы с возможностью экологически чистого управления извне погодой, климатом и иными системами планеты природными методами;
- растительный и животный мир сухопутных и водных экосистем (включая микрофлору и микрофауну) с сохранённым и ныне доступным их биоразнообразием;
- земное человечество, каждый индивидуум которого здоров и счастлив.

ТехноМир – вновь созданные индустриальные компоненты:

1) земная индустрия, сформированная на основе новых экоориентированных технологий и состоящая только из необходимых человеку внутри биосферы Земли технологических отраслей;

2) космическая индустрия, включающая вынесенные за пределы биосферы Земли энергозатратные, ресурсоёмкие, экологически вредные и другие отрасли промышленности, которые в условиях космической технологической среды приобретают абсолютное конкурентное ценовое и качественное превосходство;

3) геокосмический транспортный комплекс ОТС, обеспечивающий экологически чистую для земной биосферы транспортно-логистическую связь между земными и космическими компонентами индустриального ТехноМира с грузо-, энерго-, инфо- и пассажиропотоками индустриального масштаба;

4) искусственный интеллект для управления вышеуказанными компонентами 1–3 под многоуровневым контролем ХомоМира.

ХомоМир – усовершенствованное мировое общественно-политическое устройство, основанное на консолидации международного сообщества биологических людей (но не оцифрованных биороботов-конвергентов)

вокруг единого управляющего центра, аккумулирующего территориальный, финансовый, экономический, научный, кадровый, военный и политический потенциал всех стран-участниц. Это откроет путь к неисчерпаемым и доступным ресурсам космоса и на основе космоориентированной экономики земной техногенной цивилизации создаст новые социально-политические и экономические условия для максимально полной реализации целей устойчивого развития биологического человечества, в том числе обеспечения социальной справедливости, равноправия, свобод, гармоничного развития, а также права каждого жителя планеты на достойную долгую и счастливую жизнь. ХомоМир развивается и управляется людьми, использующими в качестве помощника и советника (но не руководителя) искусственный интеллект. Главная ценность ХомоМира – человечность Человека и его духовность как социобиологической сущности, созданной Мирозданием (Богом) в результате миллиардов лет эволюции жизни в космическом доме по имени Планета Земля.

Экосистема – биологическая система (биогеоценоз), состоящая из сообщества живых организмов (биоценоз), среды их обитания (биотоп), а также системы связей, которая осуществляет обмен веществом и энергией между ними.

ЭкоТехноПарк – демонстрационно-сертификационный центр транспортно-инфраструктурных решений uST, построенный в Республике Беларусь (г. Марьина Горка).

Sustainable Biosphere Cluster (SBC) – центр компетенций в области озеленения пустынь. SBC станет основой для воплощения технологической платформы uGreen в условиях жаркого тропического климата – среды с факторами негативного воздействия (например, высокая температура), влияющими на культивирование растений.

Sustainable-BioTech – экологическая система, сочетающая в себе комплекс инновационных инженерных, агро-, био- и почвообразующих технологий. Основные её компоненты: реликтовое и органическое сырьё, а также не тронутая пахотой почва и почвенные микроорганизмы, взятые особым образом из мирового Банка почв uTerra, расположенного в Республике Беларусь на территории КФХ «Юницкого» (г. Марьина Горка). Сырьё окончательно перерабатывается в живой плодородный гумус с помощью ассоциаций почвенных микроорганизмов и уникального вида червей *Lumbricus uTerris*, специально выведенного в КФХ «Юницкого».

uBioSystem – замкнутая экосистема с контролируемыми технологическими процессами (освещение, температурный режим, воздушный обдув, скорость течения воды и др.) для автономного и длительного существования сообщества живых организмов.

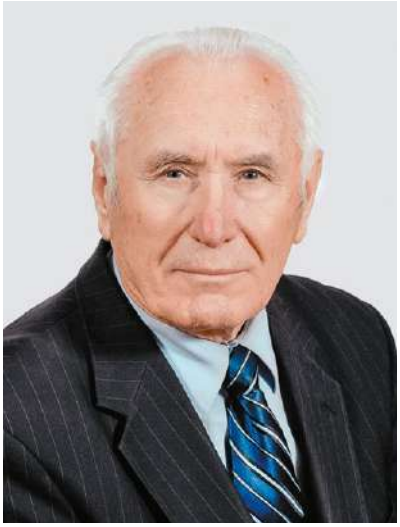
uMach – концепт гиперскоростного транспортно-инфраструктурного комплекса uST. Предназначен для передвижения со скоростью выше 600 км/ч внутри форвакуумного тоннеля (с искусственно сниженным атмосферным давлением) для обеспечения перевозок на значительные (от 200 км) расстояния.

uSocio – оптимальная социальная среда нового типа для проживания малочисленных групп людей (2000–5000 человек), основанная на методе стратификации. В uSocio благодаря возможности свободного выбора места проживания удовлетворяются социальные потребности: социокультурные связи, общие ценности, религиозные мировоззрения, соблюдение традиций, увлечение искусством, развитие этнических и межэтнических контактов и др.

uTerra – биогумус (рассыпчатый и жидкий – эликсир плодородия), производимый из бурого угля, золы, органического сырья, инокулята, аэробных и анаэробных микроорганизмов, используемый для повышения плодородия и улучшения качественных характеристик любых почв, в том числе песков пустыни.

Рецензии на сборник научных трудов VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса

Рецензия Петра Витязя,



академика НАН Беларуси, доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки Республики Беларусь, лауреата Государственной премии и премии Союзного государства в области науки и техники, начальника управления аэрокосмической деятельности НАН Беларуси, заместителя руководителя Агентства по космическим исследованиям НАН Беларуси

VIII Глобальная конференция по индустриализации ближнего космоса, состоявшаяся в сентябре 2025 г. на территории экопарка «Акварель» (г. Марьина Горка, Беларусь), стала значимой научной площадкой для ведущих учёных, инженеров и специалистов, занятых в сферах космической деятельности, инновационных транспортных решений, материаловедения и биотехнологий для замкнутых систем.

Мне посчастливилось в третий раз принять активное участие в данном международном мероприятии. Следует отметить его устойчивую положительную динамику развития. Ежегодно возрастает интерес научного сообщества, увеличивается количество представленных фундаментальных и прикладных работ, расширяется география участников. Тематическое наполнение выступлений приобретает более междисциплинарный и ориентированный на практическую реализацию характер, что вызывает живой профессиональный отклик и конструктивные дискуссии среди специализированной аудитории.

Участие в конференции представителей Союзного государства России и Беларуси имеет особую значимость. Уже в октябре 2025 г. для обсуждения ключевых вопросов, поднятых на форуме, состоялось выездное заседание Научно-экспериментального совета при Постоянном Комитете Союзного государства, посвящённое теме «Реализация проектов коммуникационных систем на базе технологий струнного транспорта в рамках российско-белорусского партнёрства». По итогам данной встречи подтверждены надёжность и экономическая обоснованность струнного транспорта и принято решение о дальнейшем сотрудничестве. Таким образом, конференция выступила не только научной, но и институционально-стратегической площадкой, способствующей трансформации инновационных идей в конкретные управленческие решения межгосударственного масштаба, что свидетельствует о высокой ценности достигнутых результатов.

Практически все доклады рецензируемого сборника посвящены реализации программы «ЭкоМир». Материалы структурированы в рамках четырёх секций, каждая из которых по глубине исследования может стать отдельной конференцией. Во всех секциях активное участие принимал инициатор и организатор данного мероприятия – инженер мирового уровня А.Э. Юницкий, а также его ученики и коллеги. Наряду с докладами представителей школы Юницкого в сборник включены работы специалистов других научных организаций разных стран, что повышает значимость издания и подтверждает его международный междисциплинарный статус.

В первой секции «Геокосмические и геотехнические науки, технологии, материалы и ресурсы» большой интерес вызвал доклад А.Э. Юницкого, где автор проанализировал перспективы существующих транспортных систем и разрабатываемых его учениками и коллегами струнных

транспортных комплексов, а также стратегии внедрения передовых технологий на Земле и в космосе. Многие из предлагаемых решений, создаваемых для геокосмической логистики, могут быть использованы уже сегодня в земных условиях. У Союзного государства, и Республики Беларусь в частности, имеется возможность стать основателями новой концепции развития скоростных транспортных систем, начиная с урегулирования локальных проблем, таких как:

- внутригородская логистика между зданиями;
- связь жилых и промышленных территорий;
- транспортное обеспечение между зонами проживания и отдыха;
- преодоление природных труднопроходимых, заповедных и водных местностей.

Следует отметить, что некоторые проекты уже реализуются. Таким образом, рассматриваемые в сборнике решения выходят за рамки теоретических концепций и вступают в фазу прикладной инженерной апробации.

В основе многих докладов первой секции лежит глобальная цель А.Э. Юницкого – создание общепланетарного транспортного средства, с помощью которого будет реализована мечта белорусского изобретателя: «Земля – для жизни. Космос – для индустрии».

В секции «Энергетические и информационные геокосмические науки, технологии, материалы и ресурсы» заслуживает внимания статья В.Ю. Клюшникова, посвящённая разработке внеземных ресурсов. Автор указывает на необходимость комплексного решения не только технических и технологических проблем, но и правовых вопросов межнационального характера. Поднятая тема имеет фундаментальное значение для формирования системы космического ресурсопользования.

Важные аспекты отражены в работе группы учёных во главе с А.В. Рысиным. Исследователями из Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения рассмотрено интеллектуальное управление производством космических аппаратов с использованием цифровых двойников, которое базируется на математическом описании процесса сборки космических аппаратов, включающем геометрические, кинетические и динамические представления объектов, методах оптимизации, моделировании взаимодействия и системе адаптивного управления. Применение предложенных подходов позволит обеспечить высокую точность и надёжность аппаратов космического назначения.

Особо хочется отметить доклад, посвящённый участию О.С. Мастицкой в международном проекте SIRIUS-23, в рамках которого экипаж из шести человек находился в годовой изоляции. Цель проекта – изучение адаптационных процессов, наблюдающихся в организме человека при моделировании комплекса факторов космического полёта в герметично замкнутом объекте с искусственной средой обитания. Белорусская участница рассказала о наземной подготовке и проведённых экспериментах – моделировании полёта на Луну, высадки на её поверхность, возвращения на Землю, выхода в открытый космос, а также о других задачах миссии. В соответствии с международным проектом SIRIUS-23 все эксперименты выполнялись в замкнутом объёме технического модуля Института медико-биологических проблем Российской академии наук. Полученные результаты имеют существенную научную ценность для реализации глобальной стратегии освоения космического пространства.

Таким образом, сборник трудов конференции охватывает широкий спектр тематик – от технологий возведения экоориентированных поселений до вопросов строительства общепланетарного транспортного средства, создания контролируемого микроклимата, изучения различных аспектов длительного проживания человека в космосе, а также обеспечения надёжности систем и др. Отдельного внимания достойны доклады, касающиеся линейных городов и ЭкоКосмоДомов на планете Земля. Данные проекты можно внедрять уже сегодня, они привлекательны для бизнеса, важны для экономического роста и решения социальных проблем в разных регионах мира.

Сборник демонстрирует высокую степень теоретической обоснованности и практической ориентированности представленных исследований, тем самым подтверждая актуальность рассматриваемых направлений для будущего космической индустриализации и устойчивого развития земной инфраструктуры. Он по праву заслуживает статуса значимого научного издания международного уровня.

Конференция выступила не только научной, но и институционально-стратегической площадкой, способствующей трансформации инновационных идей в конкретные управленческие решения межгосударственного масштаба.

Рецензия Сергея Чижика,

академика НАН Беларуси, доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки Республики Беларусь

В сборнике научных трудов VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса представлен масштабный объём междисциплинарных исследований, охватывающих инженерно-технические, материаловедческие, энергетические, биологические, экологические и социально-правовые аспекты формирования космотехногенной цивилизации. Идея индустриального освоения космоса уже не кажется фантастической и такой удалённой во времени. Актуальность направления неоднократно подтверждалась участниками данного ежегодного форума как с точки зрения поиска и вовлечения новых ресурсов в развитие мировой экономики, так и для защиты от глобальных экологических и космологических катастроф, угрожающих землянам. В докладах конференции продемонстрирована научная состоятельность промышленного освоения околоземного пространства, а также перехода от декларативных концепций к системно проработанным инженерным и экспериментально подтверждённым решениям.

Важной особенностью настоящего издания является органичное сочетание фундаментальных исследований с прикладными задачами создания геокосмической транспортной инфраструктуры, замкнутых экосистем и новых функциональных материалов, что полностью соответствует современным тенденциям устойчивого технологического развития, ресурсной эффективности и экологической безопасности.

Структурно сборник трудов конференции выстроен в виде тематически взаимосвязанных секций, каждая из которых отражает ключевые направления формирования технологической и социальной основы для индустриализации ближнего космоса.

Секция «Геокосмические и геотехнические науки, технологии, материалы и ресурсы» объединяет исследования, ориентированные на изучение особенностей и проектирование инженерно-технологической базы геокосмического летательного аппарата и сопутствующей инфраструктуры. Работы охватывают вопросы моделирования и стабилизации инновационного транспортного комплекса, аэродинамики эстакадных сооружений, систем жизнеобеспечения, новых композитных материалов. Наиболее значимой в этой секции, как и во всей конференции, является проблемно-постановочная статья А.Э. Юницкого «Роль струнных технологий в будущей земной, геокосмической и космической логистике», в которой на концептуальном, инженерном и философском уровнях обоснованы программа «ЭкоМир» и провозглашаемый ею главный принцип «Земля – для жизни. Космос – для индустрии». Исследование выделяется глубиной анализа и комплексным осмыслением глобальных экологических, транспортных и цивилизационных проблем. Автор предлагает теоретические расчётные модели и технические решения, направленные на создание новой логистики, системы жизнеобеспечения и достижение

экологического баланса на Земле и в космосе. Работа подчёркивает объективную неизбежность перехода к новой цивилизационной модели «Земля – для жизни. Космос – для индустрии».

В рамках данной секции высокой научно-практической значимостью обладает исследование «Моделирование полёта общепланетарного транспортного средства» (А.Э. Юницкий, В.Л. Лукша). Представленная авторами математическая модель может рассматриваться в качестве методологического вычислительного инструмента для проектирования автоматизированных систем управления геокосмическим транспортным средством, что делает статью одной из ключевых в технической части сборника.

С позиций современного материаловедения ценна работа «Применение кварценаполненного композита в ответственных узлах взлётно-посадочной эстакады общепланетарного транспортного средства» (М.В. Мозгалёва, Е.Н. Зеленкова, В.Н. Гаранин, С.В. Мозгалёв). Исследование демонстрирует научную концепцию создания нового композитного материала, предполагающую задействование пылевидного кварца как функционального наполнителя. Полученные образцы по прочностным характеристикам, усадке и кинетике отверждения имеют существенный практический интерес для возведения высоконагруженных и износостойких узлов транспортной инфраструктуры, а также могут стать основой для дальнейшего изучения микроструктуры, долговечности, прочностных и трибологических свойств подобных композитов.

Отдельного внимания заслуживает статья «Использование грибного мицелия для изготовления аналога кожи с целью применения в текстильной промышленности» (И.В. Налетов, В.С. Заяц, П.А. Буглак), в которой показан междисциплинарный подход в смежной области на стыке материаловедения, биотехнологий и инженерных решений для замкнутых экосистем. Работа актуальна как для космических станций, так и для земных производств.

В секции «Энергетические и информационные геокосмические науки, технологии, материалы и ресурсы» собраны исследования, направленные на построение энергетической, информационно-управляющей и ресурсной базы для индустриализации ближнего космоса. Особый акцент сделан на цифровизации космической индустрии, в том числе на применении технологий цифровых двойников, нейросетевого анализа и распределённых информационных систем для повышения надёжности, отказоустойчивости и автономности космических аппаратов и инфраструктурных объектов. Центральное место занимает статья В.Ю. Клюшникова «Системный анализ проблемы разработки внеземных ресурсов для индустриализации ближнего космоса», сочетающая инженерный, правовой и экологический подходы. Автором сформулированы требования к технологиям добычи и переработки, а также к логистике внеземных ресурсов, обозначены потенциальные риски, в том числе проблемы космического мусора и правового регулирования использования космического пространства.

В секции «Экологические и биологические аспекты замкнутых экосистем биосферного типа на Земле и в космосе» приводятся статьи по комплексным прикладным биологическим исследованиям, охватывающим моделирование замкнутых экосистем, агробиотехнологии интенсивного растениеводства, микробиологическое обеспечение плодородия почв, а также медико-биологические аспекты адаптации живых организмов к изменённым гравитационным и экологическим условиям. В частности, статья «Способ коррекции двигательных нарушений у лабораторных мышей при антиортостатической гипокинезии» (Н.В. Жешко, И.В. Налетов) предлагает решение одной из ключевых проблем длительного пребывания в условиях микрогравитации, что имеет практическое значение для космической медицины и изучения адаптации человека к невесомости.

Важной особенностью настоящего издания является органичное сочетание фундаментальных исследований с прикладными задачами создания геокосмической транспортной инфраструктуры, замкнутых экосистем и новых функциональных материалов, что полностью соответствует современным тенденциям устойчивого технологического развития, ресурсной эффективности и экологической безопасности.

В секции «Социальные, правовые, политические и финансовые аспекты развития человеческой цивилизации на Земле и в космосе» рассматриваются вопросы трансформации общественных ценностей и социально-психологических установок, образования новых урбанистических и инфраструктурных концепций (линейные города, экваториальные транспортные коридоры). В рамках данной секции также проведён анализ социально-экономических эффектов от внедрения масштабных геокосмических проектов. Существенное внимание уделено правовому обеспечению и проблематике интеллектуальной собственности, подготовке кадров, описаны механизмы поддержки принятия решений и проектного управления. В статье «Правовые вопросы создания объектов интеллектуальной собственности в космическом пространстве» (А.П. Казакевич) подчёркивается наличие нерешённых вопросов в сфере интеллектуальной собственности при коммерциализации космоса. Предложенные рекомендации важны при формировании международных нормативных механизмов регламентирования деятельности по освоению космического пространства.

Таким образом, сборник научных трудов VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса демонстрирует многосторонний и своевременный анализ проблемы, всё более остро встающей перед человечеством. Опубликованные работы опираются на современные теоретические и экспериментальные исследования и обоснованные инженерные расчёты. Междисциплинарный характер представленных материалов – от геокосмической логистики, технических и материаловедческих решений до урегулирования правовых вопросов освоения околоземного пространства, а также регулярность проведения конференций свидетельствуют о глубоком и настойчивом подходе коллектива, сформированного лидером и учредителем конференции инженером А.Э. Юницким, о стремлении заглянуть за горизонт и проложить путь в космическое будущее. Результаты работ, содержащихся в сборнике, обладают научной и практической ценностью и могут быть интегрированы в национальные и международные проекты по освоению космоса.

Учитывая актуальность статей, их научную и социальную значимость, следует рекомендовать сборник научных трудов VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса к публикации в открытой печати. Издание заслуживает внимания мирового сообщества и может стать основой для дальнейших инженерных исследований, ориентированных на сохранение нашей планеты, продуманное и разумное освоение околоземного пространства.

Междисциплинарный характер представленных материалов – от геокосмической логистики, технических и материаловедческих решений до урегулирования правовых вопросов освоения околоземного пространства, а также регулярность проведения конференций свидетельствуют о глубоком и настойчивом подходе коллектива, сформированного лидером и учредителем конференции инженером А.Э. Юницким, о стремлении заглянуть за горизонт и проложить путь в космическое будущее.

Рецензия Александра Маляревича,

члена-корреспондента НАН Беларуси, доктора физико-математических наук, профессора

Материалы, включённые в сборник трудов VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса, продолжают развивать концепцию, сформулированную в XX в. выдающимся инженером А.Э. Юницким. Международный форум, ставший ежегодным, привлекает к реализации программы безракетного освоения космического пространства широкие слои научного и инженерно-технического мирового сообщества. На каждой последующей конференции озвучиваются всё более детализированные пути решения конкретных задач. Благодаря данному мероприятию представители науки, инженеры, специалисты различных направлений получают площадку для демонстрации своих разработок, что способствует привлечению новых единомышленников, ориентированных на дальнейшее развитие и совершенствование человеческой цивилизации.

В сборнике выделено несколько тематических блоков: технические аспекты функционирования общепланетарного транспортного средства (ОТС); обеспечение условий для длительного, автономного, комфортного проживания и деятельности в ЭкоКосмоДоме (ЭКД) на орбите Земли; способы эффективной добычи ресурсов, доступных в космическом пространстве; правовые и иные вопросы взаимодействия государств в ходе реализации программы uSpace.

При всём многообразии представленных материалов считаю, что главная идея VIII Глобальной конференции сформулирована в работе А.Э. Юницкого «Роль струнных технологий в будущей земной, геокосмической и космической логистике». Помимо важности дальнейшего развития идеи безракетной индустриализации космоса автор показал направления, которые уже сейчас могут быть реализованы на Земле отдельными государствами или межгосударственными объединениями: строительство малоэтажных поселений в рамках концепции линейных городов uCity, обеспечение быстрого и эффективного передвижения с помощью струнного транспорта, в том числе через труднопроходимые территории (тундра, заболоченные местности, др.), восстановление плодородия в пустынных местностях, иное.

Материалы, включённые в сборник трудов VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса, продолжают развивать концепцию, сформулированную в XX в. выдающимся инженером А.Э. Юницким.

Научно обоснованные технические решения продемонстрированы в статьях, исследующих вопросы эксплуатации ОТС и его конструктивных элементов. Так, рассмотрены задачи стабилизации ОТС относительно взлётно-посадочной эстакады, что актуально по причине переменчивой погоды на Земле и, в частности, поведения Мирового океана, в акватории которого планируется размещение большинства опор эстакады ОТС. Кроме того, анализируется влияние сетчатых ограждений на аэродинамическое сопротивление юнимобилей, движущихся в тоннелях эстакады ОТС, а также представлена технология создания композитных материалов для строительства взлётно-посадочного комплекса.

Близко связаны с вышеуказанным следующие темы данного сборника: навигация автономных космических аппаратов, технология получения водоугольного топлива, а также разработка ресурсов, имеющихся на различных космических объектах.

Большое внимание в материалах конференции уделено проблемам функционирования замкнутой системы, в том числе в ЭКД, – значимой области исследований, изучаемой с момента первых космических полётов. Развитие производства в ближнем космосе в соответствии с концепцией А.Э. Юницкого «Земля – для жизни. Космос – для индустрии» предполагает длительное нахождение людей на орбите в состоянии невесомости при возможных недостаточных санитарно-гигиенических условиях и нестабильном обеспечении продуктами питания. Это подчёркивает важность поиска решений для комфортного проживания и эффективной деятельности персонала на околоземной орбите. В материалах детально рассмотрены способы поддержания микроклимата в замкнутом пространстве, технологии очистки воды, выращивания зелени и иные аспекты, которые на первый взгляд кажутся не слишком существенными. Однако при длительном пребывании вдали от привычной среды обитания именно такие факторы могут вызвать неприятные и даже стрессовые реакции.

С этой точки зрения стоит отметить статью «Международный проект SIRIUS-23», в которой рассказано об участии нашей соотечественницы О.С. Мастицкой в данном научном исследовании. В рамках изоляционного эксперимента она провела целый год в условиях, моделирующих космический полёт, выход в открытый космос и на поверхность космического объекта.

Несомненно, доклады, представленные в сборнике научных трудов, интересны инженерам, физикам, химикам, биологам, социологам и другим специалистам, неравнодушным к будущему человечества. Считаю, что материалы VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса следует опубликовать в открытой печати.

Уважаемые читатели!

Настоящий сборник научных трудов подготовлен по материалам VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса (12–13 сентября 2025 г., г. Марьина Горка, Беларусь).

Издание освещает итоги годовой деятельности учёных, конструкторов, инженеров, работающих над реализацией геокосмической программы uSpace. Каждый из представленных в сборнике проектов находит своё воплощение и тестируется на испытательных площадках России, Беларуси и Объединённых Арабских Эмиратов. Индустриализация ближнего космоса, перенос вредной промышленности на околоземную орбиту – это единственно возможный способ сохранения экологии планеты, а также решения социально-экономических проблем современности, призванный обеспечить достойное будущее грядущим поколениям. Только осуществив промышленное освоение околоземного пространства, мы сможем совершить полномасштабную экспансию в космос, открыть человеческой цивилизации доступ к неиссякаемым источникам ресурсов и создать базу для развития науки и высоких технологий.

Программа uSpace объединяет ведущие разработки в широком спектре научных дисциплин, описывающие различные аспекты пребывания человека за пределами Земли, уникальные исследования и ноу-хау в области космоса, инновационных видов транспорта, промышленности, биотехнологий, социологии и философии, представляющие интерес и ценность для научного сообщества всего мира.

Глобальный характер программы подразумевает возможность активного участия специалистов всех сфер и направлений, обеспечивает эффективную коммуникацию для совместной созидательной деятельности на благо человечества.

Каждый день мы приближаем к реализации самый амбициозный проект освоения космоса.

Присоединиться к программе uSpace можно уже сейчас.

uspaceprogram.com | Facebook | LinkedIn | YouTube

Свои отзывы, пожелания и предложения направляйте по адресу: info@uspaceprogram.com.

Организационный комитет конференции,
редакционная коллегия сборника

Для заметок

Для заметок

Б39 Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: сб. науч. тр. VIII Глобал. конф. по индустриализации ближ. космоса, Марьина Горка, 12–13 сент. 2025 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск: СтройМедиаПроект, 2026. – 564 с.
ISBN 978-985-7296-97-2.

Статьи сборника отражают тематику и содержание докладов, представленных на VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса, состоявшейся 12–13 сентября 2025 г. в г. Марьина Горка (Беларусь).

Рассмотрены вопросы развития геокосмических, энергетических и информационных технологий в рамках программы «ЭкоМир» и её космического вектора – программы uSpace. Показана роль струнных технологий в земной и космической логистике; предложена математическая модель общепланетарного транспортного средства. Уделено внимание проблемам освоения космоса, добычи внеземных ресурсов и получения новых материалов; освещены вопросы интеллектуального управления производством космических аппаратов с использованием цифровых двойников. Представлен прототип интеллектуальной системы восстановления навигационных данных; описаны перспективы биопечати в космосе. Затронуты экологические и биологические аспекты существования замкнутых экосистем биосферного типа. Озвучен опыт участия представителя Беларуси в международном проекте SIRIUS-23. Проанализированы социальные, правовые, политические и финансовые аспекты развития человеческой цивилизации, включая новую урбанистическую концепцию uCity, трансграничный африканский транспортно-инфраструктурный коридор, инженерную школу Юницкого, правовые вопросы интеллектуальной собственности в космосе и др.

Сборник содержит работы ведущих инженеров, изобретателей, учёных, представителей общественных организаций Беларуси, стран ближнего и дальнего зарубежья.

Издание предназначено для широкого круга специалистов, работающих в области транспортных коммуникаций, космических исследований, астрофизики, экологии, биотехнологий, а также для сотрудников научно-исследовательских организаций и лабораторий, преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов.

Научное издание

БЕЗРАКЕТНАЯ ИНДУСТРИАЛИЗАЦИЯ БЛИЖНЕГО КОСМОСА: ПРОБЛЕМЫ, ИДЕИ, ПРОЕКТЫ

Сборник научных трудов VIII Глобальной конференции по индустриализации ближнего космоса
(Марьина Горка, 12–13 сентября 2025 г.)

Редакционная коллегия:

главный редактор: Юницкий А.Э., доктор философии транспорта; ответственный редактор: Исаев Д.А.; научный координатор: Яблонская Е.И.; редакторы секций: Артюшевский С.В.; Шебзухов Ю.А.; Зыль Н.С.; Казакевич А.П.; Петров Е.О.; консультант по имиджевым стратегиям: Котишевская О.В.; редактор: Будивская Л.В.; научные консультанты: Литвинчук А.А., к. т. н.; Гаранин В.Н., к. т. н.; Власовец Е.Н., магистр экономики; Налетов И.В., магистр с.-х. наук.

Рецензенты статей:

Плескачевский Ю.М., член-корреспондент НАН Беларуси, д. т. н., профессор, заслуженный деятель науки Республики Беларусь; Надирханов У.С., д. э. н., ТГТрУ (Узбекистан); Сансызбай К.М., доктор философии (информационные системы), МУИТ (Казахстан); Суюнбаев Ш.М., д. т. н., профессор, ТГТрУ (Узбекистан); Коновалов С.В., д. т. н., профессор, СибГИУ (Россия); Ковальчук И.Н., д. т. н., Swinburne University of Technology (Австралия); Будрина И.Т., д. социол. н., AM Consultancy (Румыния); Шмарловская Г.А., д. э. н., профессор, БГЭУ (Беларусь); Куган С.Ф., д. э. н., БГУИР (Беларусь); Невзорова А.Б., д. т. н., профессор, ГГТУ им. П.О. Сухого (Беларусь); Золотарёва О.А., д. э. н., Академия управления при Президенте Республики Беларусь; Бахтиярова Е.А., к. т. н., МУИТ (Казахстан); Сергиенко В.П., к. т. н., ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси; Раповец В.В., к. т. н., БГТУ (Беларусь); Зубовская И.В., к. вет. н., ИЭВ им. С.Н. Вышелесского (Беларусь); Лукша О.В., к. х. н., ИОНХ НАН Беларуси; Новиков С.П., к. ф.-м. н., БелГУТ (Беларусь); Дорощук О.В., к. б. н., ЦНИИКИВР (Беларусь); Лаевская Е.В., к. т. н., ИОНХ НАН Беларуси; Субоч Ф.И., к. т. н., Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси; Кем К.Р., к. б. н., ИЭБ им. В.Ф. Купревича НАН Беларуси; Новикова О.Н., к. вет. н., ИЭВ им. С.Н. Вышелесского (Беларусь); Абдужабаров Н.А., к. т. н., ТГТрУ (Узбекистан); Гегедеш М.Г., к. т. н., ГГТУ им. П.О. Сухого (Беларусь); Лукаш Е.В., к. т. н., БГТУ (Беларусь); Чигамбаев Т.О., к. т. н., КазНИТУ им. К.И. Сатпаева (Казахстан); Поляруш С.В., к. б. н., Linnaeuz Biomedpharm Consulting (Узбекистан); Ильючик И.А., к. б. н., Полесский государственный университет (Беларусь); Христофорова Л.В., к. э. н., Медицинский университет «Реавиз» (Россия).

Рецензенты сборника:

Витязь П.А., академик НАН Беларуси, д. т. н., профессор, заслуженный деятель науки Республики Беларусь, лауреат Государственной премии и премии Союзного государства в области науки и техники, начальник управления аэрокосмической деятельности НАН Беларуси, заместитель руководителя Агентства по космическим исследованиям НАН Беларуси; Чижик С.А., академик НАН Беларуси, д. т. н., профессор, заслуженный деятель науки Республики Беларусь; Маляревич А.М., член-корреспондент НАН Беларуси, д. ф.-м. н., профессор.

Редакторы, корректоры: Будивская Л.В., Линевич Т.А., Яковлева К.В.
Компьютерная вёрстка: Луд И.И., Горбунова Н.А., Богодяж М.А., Беспалова В.В.
Дизайн обложки: Быкова О.Г., Волобуев Р.М., Скорикова Э.М.
Визуализации и иллюстрации: Волобуев Р.М., Быкова О.Г., Сирый М.И., Шангин С.В., Пикта А.В., Семак А.М., Кузьмич В.А., Скорикова Э.М.

Авторы опубликованных материалов несут ответственность за достоверность приведённых в них сведений.
В процессе работы над изданием использованы данные из открытых интернет-источников.

Подписано в печать 27.04.2026. Формат 60×84/8. Бумага мелованная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 65,56. Уч.-изд. 63,39. Тираж 500 экз. Заказ 286.

Издатель и полиграфическое исполнение: Государственное предприятие «СтройМедиаПроект».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий: № 1/43 от 03.10.2013, № 2/42 от 13.02.2014.
Ул. В. Хоружей, 13/61, 220123, г. Минск.

УДК 629.78
ББК 39.6я43
Б39
ISBN 978-985-7296-97-2

© ООО «Астроинженерные технологии», 2026
© ЗАО «Струнные технологии», 2026
© Юницкий А.Э., 2026
© Оформление. Государственное предприятие «СтройМедиаПроект», 2026