

Урбанистика и городские системы <https://ugsjournal.ru>
Urban Studies and Urban Systems

2024, Том 1, № 4 / 2024, Vol. 1, Iss. 4 <https://ugsjournal.ru/issue-4-2024.html>

URL статьи: <https://ugsjournal.ru/PDF/03SAUG424.pdf>

2.1.12 Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности

Ссылка для цитирования этой статьи:

Алсалех, М. Надувные конструкции в космосе: от модуля BEAM к будущим орбитальным отелям / М. Алсалех // Урбанистика и городские системы. — 2024. — Т. 1. — № 4. — URL: <https://ugsjournal.ru/PDF/03SAUG424.pdf>.

For citation:

Al Saleh M. Inflatable structures in space: from the BEAM module to future orbital hotels. *Urban Studies and Urban Systems*. 2024;1(4): 03SAUG424. Available at: <https://ugsjournal.ru/PDF/03SAUG424.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 721

Мария Алсалех

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», Москва, Россия

Аспирант

E-mail: Marym9162@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8565-2587>

Надувные конструкции в космосе: от модуля BEAM к будущим орбитальным отелям

Аннотация. Парадигма создания обитаемых объёмов в космическом пространстве претерпевает радикальную трансформацию, смещаясь от жёстких, массоограниченных металлических модулей к лёгким, трансформируемым и надувным конструкциям. Этот переход, впервые реализованный в таких технологических демонстраторах, как Надувной жилой модуль BEAM (Bigelow Expandable Activity Module) на Международной космической станции (МКС) и активно продвигаемый частными компаниями, открывает путь для нового поколения долговременных миссий, коммерческих космических станций и орбитальных отелей. В данной статье рассматривается эволюция надувной архитектуры, анализируются её технологические основы, подтверждённые опытом эксплуатации модуля BEAM, ключевые преимущества для будущих орбитальных сред обитания, а также уникальные инженерные и медико-психологические проблемы, которые необходимо решить для реализации концепции комфортабельных и безопасных коммерческих объектов на орбите. Успех модуля BEAM дерискует базовые технологии и предоставляет фундаментальный набор данных для всех будущих разработок. Основные преимущества надувной архитектуры для таких коммерческих применений, как орбитальные отели, включают исключительное соотношение стартового и полезного объёма, повышенную защиту от радиации и микрометеороидов, а также улучшенные условия обитаемости. Однако путь от демонстратора технологий до комфортабельной орбитальной гостиницы сопряжён с серьёзными вызовами в области материаловедения, механизмов развёртывания, интеграции систем жизнеобеспечения и создания соответствующей нормативно-правовой базы. В заключение утверждается, что надувная архитектура представляет собой наиболее перспективный путь для создания просторных, безопасных и пригодных для жизни сред, необходимых для будущего коммерческих пилотируемых полётов в космос.

Ключевые слова: надувная среда обитания; трансформируемая архитектура; космические станции; орбитальные отели; модуль BEAM; коммерческий космос; лёгкие конструкции; космический туризм; обитаемость

Введение

Исторически космические станции, от «Салюта» до модулей МКС, представляли собой жесткие монолитные металлические конструкции. Такая архитектура накладывала фундаментальные ограничения, связанные с массой и габаритами полезной нагрузки, определяя высокую стоимость выведения. Современный этап освоения космоса, характеризующийся ростом частного сектора и планами по освоению Луны и Марса, требует новой парадигмы. Ей становятся легкие разворачиваемые конструкции, способные в десятки раз увеличить полезный герметичный объем при сохранении стартовых габаритов. Эта революция ставит целью переход от тесных утилитарных «металлических труб» к просторным, психологически комфортным и функционально зонированным пространствам, аналогичным наземным объектам. Данная статья всесторонне анализирует эволюцию данной технологии, ее валидацию в полете, преимущества для рынка и комплексные вызовы на пути реализации масштабных коммерческих проектов [1].

Методы и материалы

В основу работы положен комплексный анализ технологических, инженерных и эксплуатационных аспектов. Методология включает:

Анализ исторических прецедентов и летной демонстрации: Изучение эволюции технологии – от ранних проектов, таких как спутники Echo (1960-е гг.) и советский надувной шлюз для выхода в открытый космос (1965 г.), до ключевого современного демонстратора – Надувного жилого модуля Bigelow Expandable Activity Module (BEAM) на Международной космической станции (МКС). Детально проанализированы технические характеристики BEAM (запуск в 2016 году, масса 1,413 кг, объем после разворачивания 16.0 м³, материалы на основе волокна Vectran), процесс его разворачивания (включая первоначальные сложности и успешную реализацию), а также данные, собранные за время его многолетней эксплуатации до 2028 года включительно.

Сравнительный анализ материалов и конструкций: Рассмотрены современные материалы для надувных конструкций, включая многослойные композиты на основе полимеров (полиэтилен, полиуретан), высокопрочные ткани (Vectran, Kevlar, Nextel) и металлизированные пленки. Особое внимание уделено перспективным нанокompозитным материалам, содержащим оксиды висмута (Bi₂O₃), бор (B) или вольфрам (W), которые демонстрируют повышенную эффективность в качестве радиационной защиты по сравнению с традиционными материалами [2]. Исследованы инженерные методы моделирования и тестирования структурной целостности, включая анализ деформации («ползучести») материалов при длительном давлении и моделирование утечек с помощью методов конечных элементов (FEA) [3].

Обзор технологических и системных требований: Проанализированы ключевые подсистемы, необходимые для создания автономной обитаемой среды. К ним относятся системы жизнеобеспечения (ECLSS), отвечающие за регенерацию воздуха, воды, удаление CO₂ и управление отходами; системы радиационной и противоударной защиты от микрометеороидов и космического мусора (MMOD); архитектурно-планировочные решения, направленные на обеспечение психологического комфорта.

Исследование рыночных тенденций и нормативной базы: Использованы данные рыночных исследований, прогнозирующих рост мирового рынка надувных обитаемых модулей с 1,42 млрд. долларов США в 2024 году до 4,21 млрд долларов к 2033 году (CAGR 13.7%). Рассмотрены разнообразные приложения технологии – от коммерческого туризма и научных исследований до оборонных миссий и лунных баз. Проанализированы вызовы в области

стандартизации и регулирования, основанные на обзоре развивающейся национальной законодательной базы в области космической деятельности в различных странах [4; 5].

Этот мультидисциплинарный подход позволил всесторонне оценить текущее состояние, преимущества и ключевые проблемы на пути реализации проектов коммерческих орбитальных станций и отелей на основе надувных технологий.

Информационную базу исследования составили научные публикации таких авторов как Камолов С.Г. [1], Ahmad H [2], Glaser R [3], Моттаева А.Б. [4], Макаров М.Ю. [5], Бурякова М.В. [6], Сарвут Т.О [7], Биткин В.Е. [8], Карпова О.И. [9], Лыткин В.В. [10], Бельский А.Н. [11].

Результаты и обсуждение

Эксплуатация модуля BEAM на МКС с 2016 года предоставила уникальные операционные данные, подтвердившие принципиальную жизнеспособность концепции [4].

- **Структурная надежность:** несмотря на первоначальные трудности с развертыванием из-за «слипания» слоев ткани после 10-месячной задержки, модуль был успешно развернут и продемонстрировал стабильность в условиях экстремальных термических циклов и микрогравитации. Долговременные тесты на «ползучесть» материалов (например, испытания Lockheed Martin, превысившие 1500 часов без отказа при давлении, близком к предельному) подтверждают структурную целостность¹.
- **Защита от внешних угроз:** Сенсоры зафиксировали несколько вероятных ударов микрометеороидов, при этом многослойная структура (ткань, пеноматериалы, гибкие композиты) предотвратила пробой, соответствуя или превосходя требования к защите стандартных модулей МКС. Измерения радиационного фона внутри BEAM показали уровни, сопоставимые с алюминиевыми модулями станции, а эксперименты с 3D-печатными экранами помогли уточнить модели взаимодействия радиации с материалами.
- **Эксплуатационная гибкость:** Первоначально запланированный как двухлетний демонстратор, BEAM был перекалассифицирован как постоянный складской модуль с продленным сроком службы до 2028 года, что свидетельствует о его надежности и полезности.

1. Архитектурно-дизайнерская трансформация среды обитания

Надувная технология позволяет преодолеть ограничения традиционной архитектуры, создавая принципиально новую среду [5,6].

- **Пространство и психологический комфорт:** Ключевое преимущество — возможность создания открытых пространств с высокими потолками, функциональным зонированием (зоны отдыха, работы, общения) и установкой крупных иллюминаторов. Это критически важно для длительных миссий и является основным маркетинговым фактором для туризма.
- **Дизайн интерьера и безопасность иллюминаторов:** Задача преодоления образа «металлической трубы» решается за счет адаптивного освещения, теплых отделочных материалов и трансформируемой мебели. Крупные окна,

¹ Robert Pearlman NASA halts first attempt at deploying expandable BEAM habita, 2026 – URL: <https://www.collectspace.com/ubb/Forum30/HTML/001363.html>

выполненные из многослойных сверхпрочных прозрачных материалов, безопасно интегрируются в гибкую конструкцию через жесткие силовые рамы.

- **Акустический и тепловой контроль:** Многослойные стены обладают собственными шумопоглощающими и изоляционными свойствами. Для предотвращения «эффекта теплицы» используется комбинация внутренней изоляции, внешних радиаторов и селективных покрытий на оболочке, дополненная системами терморегуляции ECLSS.

2. Технологическая эволюция и новые архитектурные решения.

На основе опыта BEAM частные компании разрабатывают конструкции следующего поколения [7; 8].

- **Масштабирование объемов:** Sierra Space разрабатывает среду обитания LIFE, эволюция которой предусматривает создание модуля объемом до 5 000 м³. Стартап Max Space планирует создать семейство масштабируемых модулей — от 20 до 10 000 м³.
- **Материаловедение и самодиагностика:** ведется интеграция «умных» материалов. Например, исследуются пьезорезистивные нанокompозиты для обнаружения ударов микрочастиц, а также биомиметические и самовосстанавливающиеся полимеры для заделки микроповреждений.
- **Специализация модулей:** Архитекторы прогнозируют использование надувных конструкций не только как основных жилых объемов, но и в качестве гибких соединительных элементов (тоннелей) между жесткими модулями на поверхности Луны, компенсирующих неточность посадки и термические деформации.
- **Экономика и безопасность:** Кратное увеличение объема при тех же габаритах ракеты-носителя напрямую снижает стоимость выведения обитаемого кубометра. Многослойные мягкие стены по своей природе эффективнее рассеивают энергию удара микрометеороида, а интеграция водородосодержащих слоев усиливает радиационную защиту.

3. Преимущества для коммерциализации НОО и туризма

Надувная архитектура открывает уникальные возможности для рынка, движимого экономической эффективностью и комфортом [9].

- **Объем и экономика запуска:** Ключевое преимущество — кратность увеличения герметичного объема (в 4-5 раз для BEAM) при тех же габаритах ракеты-носителя. Это напрямую снижает стоимость выведения одного кубического метра обитаемого пространства.
- **Психологический комфорт и обитаемость:** Пространство, позволяющее создавать зоны с высокими потолками, большими иллюминаторами и индивидуальными каютами, критически важно для длительных миссий и является ключевым маркетинговым фактором для космических туристов.
- **Пассивная безопасность:** Многослойные мягкие стены по своей природе лучше рассеивают энергию удара микрометеороида, чем монолитный металл. Возможность интеграции в структуру водородосодержащих материалов

(например, полиэтилена) или слоев воды обеспечивает дополнительную радиационную защиту.

4. Комплексные вызовы на пути к орбитальному отелю

Переход от демонстратора к сертифицированному, комфортабельному объекту массового использования требует решения системных задач [10].

- **Долговечность и ремонтпригодность:** требуются материалы, устойчивые к атомарному кислороду и УФ-излучению в течение десятилетий. Конструкция стен по принципу «прочной шины» (несколько независимых герметизирующих слоев) минимизирует риски, но необходимы протоколы оперативного ремонта силами экипажа или робототехники.
- **Интеграция сложных систем:** Надувная оболочка — лишь основа. Необходима безупречная интеграция полномасштабных, отказоустойчивых систем ECLSS (регенерация воздуха и воды, обработка отходов), противопожарной защиты, шумопоглощения и сложной внутренней инфраструктуры. Особой инженерной задачей является создание надежных гермошлюзов и стыковочных узлов в гибких стенах.
- **Нормативное регулирование и безопасность:** Отсутствие единых международных стандартов сертификации коммерческих надувных обитаемых модулей является значительным барьером. Требуется разработка протоколов для аварийных ситуаций (разгерметизация, пожар), стандартов качества воздуха и воды, а также юридических рамок для ответственности и страхования.

Эти результаты указывают на то, что технология прошла критическую фазу проверки принципов, но для ее коммерческой зрелости необходима конвергенция инженерных решений, бизнес-моделей и международного права.

Выводы

Технология валидирована в реальных условиях полета: Модуль ВЕАМ успешно выполнил и превысил свою первоначальную миссию, доказав структурную надежность, эффективную защиту от микрометеороидов и радиации, а также долговременную герметичность надувных конструкций в космической среде. Это сняло ключевые технические сомнения и обеспечило фундамент данных для всех последующих разработок.

1. Надувная архитектура является экономически и психологически оптимальной для коммерциализации НОО: Основные преимущества — кардинальное увеличение полезного объема при запуске, снижение стоимости доставки и возможность создания просторных, зонированных интерьеров — делают эту технологию наиболее перспективной для строительства орбитальных отелей, частных станций и исследовательских парков.
2. Достижение коммерческой зрелости требует преодоления системных барьеров: Ключевыми задачами на пути от демонстраторов к массовым объектам являются: развитие самовосстанавливающихся и диагностирующих материалов; создание отказоустойчивых, полностью интегрированных систем жизнеобеспечения; разработка международных стандартов сертификации и правовых норм, регулирующих коммерческую деятельность в космосе.
3. Перспективы охватывают всю Солнечную систему: Технология не ограничивается околоземной орбитой. Она рассматривается NASA и частными

компаниями как ключевой элемент для создания сред обитания на поверхности Луны и Марса, а также для транзитных жилых модулей в дальнем космосе и надувных тепловых экранов для посадки.

Таким образом, надувные космические конструкции переживают переход от экспериментальной фазы к фазе практического применения. В ближайшем десятилетии можно ожидать развертывания первых коммерческих модулей, которые станут пионерами новой эры доступного и комфортабельного пребывания человека в космосе, заложив основу для устойчивого развития внеземной экономики и исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Камолов С.Г. Коммерциализация космической деятельности: ключевые тренды современности / С.Г. Камолов, Д.А. Миракова — DOI: 10.25198/2077-7175-2019-7-52// Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2019. — № 7. — С. 52–63.
2. Ahmad H. The use of nanomaterial polymeric materials as ionizing radiation shields / H. Ahmad, S. Al-Zhrani и др. // Radiation Physics and Chemistry. — 2023. — Т. 216. — С. 111448 — URL: https://www.academia.edu/112271415/The_use_of_nanomaterial_polymeric_materials_as_ionizing_radiation_shields
3. Glaser R. Multi-objective characterization of an inflatable space structure with a quasi-static experimental deflation and finite element analysis / R. Glaser // International Journal of Mechanical Sciences. — 2021. — Т. 205(11) – С. 106614. — URL: <https://erau.academia.edu/RadekGlaser>
4. Моттаева А.Б. Актуальные тенденции кластерного развития промышленности в Российской Федерации / А.Б. Моттаева — DOI: 10.26425/2658-3445-2025-8-3-44-62 // E-MANAGEMENT — 2023 — Т 8, № 3
5. Макаров М.Ю. Перспективные трансформируемые конструкции космических аппаратов / М.Ю. Макаров, В.В. Семенов // Космонавтика и ракетостроение. — 2019. — № 4(109). — С. 34–45. — URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_010097883/
6. Biryukova M.V. Approach to reducing vibroactivity of small spacecraft / M.V. Biryukova, A. Tufan, V.Yu. Ermakov — DOI: 10.18698/0236-3941-2023-1-4-21 // Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering. — 2023. — № 1(144). — С. 4–21
7. Сарвут Т.О. Аспекты формирования среды обитания в экстремальных условиях / Т.О. Сарвут // Вестник Евразийской науки. — 2018. — Т. 10. — № 6. — URL: <https://esj.today/PDF/36SAVN618.pdf>
8. Биткин В.Е. Выбор материалов для изготовления размеростабильных несущих конструкций / В.Е. Биткин, О.Г. Жидкова, В.А. Комаров — DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-100-117 // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. — 2018. — Т. 17, № 1. — С. 100-117. — URL: <https://journals.ssau.ru/vestnik/article/viewFile/6094/5983?ysclid=mokj8kvcr2201713455>
9. Психологическая поддержка экипажей пилотируемой космической техники: история, цели, задачи и эффективность / О.И. Карпова, И.А. Розанов, Д.М. Швед

- [и др.] – DOI 10.21687/0233-528X-2021-55-2-5-14. // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2021. – Т. 55, № 2. – С. 5-14 – EDN LWEEEN.
10. Лыткин В.В. Проблема влияния русского космизма и «Космической философии» К.Э. Циолковского на освоение космического пространства / В.В. Лыткин // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. — 2013. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problema-vliyaniya-russkogo-kosmizma-i-kosmicheskoy-filosofii-k-e-tsiolkovskogo-na-osvoenie-kosmicheskogo-prostranstva/viewer>
11. Бельский А.Н. Развитие современной ракетно-космической отрасли: роль научно-технических инноваций / А.Н. Бельский, Д.В. Карасев, Н.А. Тихонова. // Молодой ученый. — 2016. — № 20(124). — С. 124–127. — URL: <https://moluch.ru/archive/124/34155>

Maria Al Saleh

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia

E-mail: Marym9162@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8565-2587>

Inflatable structures in space: from the BEAM module to future orbital hotels

Abstract. The paradigm for creating habitable volumes in space is undergoing a radical transformation, shifting from rigid, mass-limited metallic modules to lightweight, transformable, and inflatable structures. This transition, first realized in technology demonstrators such as the Bigelow Expandable Activity Module (BEAM) on the International Space Station (ISS) and actively promoted by private companies, paves the way for a new generation of long-duration missions, commercial space stations, and orbital hotels. This article examines the evolution of inflatable architecture, analyzes its technological foundations as validated by the BEAM module's operational experience, its key advantages for future orbital habitats, and the unique engineering and human factors challenges that must be addressed to realize the concept of comfortable and safe commercial orbital facilities. The success of the BEAM module de-risks core technologies and provides a fundamental dataset for all future developments. The primary advantages of inflatable architecture for commercial applications such as orbital hotels include exceptional launch-to-volume ratios, enhanced protection against radiation and micrometeoroids, and improved habitability conditions. However, the path from a technology demonstrator to a comfortable orbital hotel is fraught with significant challenges in materials science, deployment mechanisms, integration of life support systems, and the establishment of an appropriate regulatory framework. In conclusion, it is argued that inflatable architecture represents the most promising pathway for creating spacious, safe, and livable environments necessary for the future of commercial human spaceflight.

Keywords: inflatable habitat; transformable architecture; space stations; orbital hotels; BEAM module; commercial space; lightweight structures; space tourism; habitability