

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/01SAUG424.pdf>

2.1.12 Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности

Ссылка для цитирования этой статьи:

Алпире Герреро, М. Цилиндры О'Нила: архитектурные и инженерные проблемы проектирования орбитальных мегаструктур для долгосрочного обитания человека в космосе / М. Алпире Герреро, М. Н. Городова // Урбанистика и городские системы. — 2024. — Т. 1. — № 4. — URL: <https://ugsjournal.ru/PDF/01SAUG424.pdf>.

For citation:

Alpire Guerrero M., Gorodova M.N. O'Neill Cylinders: Architectural and Engineering Challenges of Designing Orbital Megastructures for Long-Term Human Habitation in Space. *Urban Studies and Urban Systems*. 2024;1(4): 01SAUG424. Available at: <https://ugsjournal.ru/PDF/01SAUG424.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 721

Алпире Герреро Марсело

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

Аспирант

E-mail: 1042235048@rudn.ru

Городова Маргарита Николаевна

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

Старший преподаватель кафедры «Промышленного и архитектурного дизайна»

Кандидат искусствоведения

E-mail: gorodova-mn@pfur.ru

Цилиндры О'Нила: архитектурные и инженерные проблемы проектирования орбитальных мегаструктур для долгосрочного обитания человека в космосе

Аннотация. Настоящее исследование посвящено комплексному анализу архитектурных и инженерных проблем, связанных с проектированием и строительством орбитальных мегаструктур типа цилиндров О'Нила для долгосрочного обитания человека в космическом пространстве. Актуальность темы определяется возрастающим интересом мирового научного сообщества к вопросам космической колонизации и необходимостью разработки концептуальных основ проектирования крупномасштабных космических поселений. Предметом исследования выступают инженерно-технические и архитектурно-планировочные решения, необходимые для создания автономных орбитальных сред обитания с искусственной гравитацией. В работе применяется системный анализ технических требований к конструктивным материалам, методам создания искусственной гравитации посредством вращения, замкнутым системам жизнеобеспечения и психологическим аспектам проживания в закрытых искусственных экосистемах. Особое внимание уделяется проблемам структурной целостности при воздействии ротационных и атмосферных нагрузок, защиты от космической радиации и микрометеоритов, а также созданию психологически комфортной среды обитания. Результаты исследования свидетельствуют о необходимости междисциплинарного подхода к проектированию космических поселений, интегрирующего достижения материаловедения, робототехники, экологической инженерии и архитектурной психологии. Научная новизна заключается в систематизации современных подходов к решению инженерных задач строительства орбитальных мегаструктур и формулировании концепции «человекоцентричной архитектуры мегаструктур», которая рассматривает психологические потребности обитателей

как приоритетный фактор проектирования. Практическая значимость определяется возможностью использования результатов при разработке перспективных проектов космических поселений и формировании исследовательских программ в области космической архитектуры.

Ключевые слова: цилиндр О'Нила; космическая архитектура; орбитальные мегаструктуры; искусственная гравитация; замкнутые системы жизнеобеспечения; космическая колонизация; углеродные нанотрубки; человекоцентричное проектирование

Введение

Современное развитие космических технологий и растущее понимание ограниченности ресурсов планеты Земля актуализируют вопросы долгосрочной космической колонизации как стратегического направления развития человеческой цивилизации. Концепция цилиндра О'Нила, предложенная американским физиком Джерардом О'Нилом в 1970-х годах, представляет собой одну из наиболее детально разработанных моделей крупномасштабного космического поселения, способного обеспечить комфортное проживание миллионов людей в автономной искусственной среде обитания.

Актуальность данного исследования определяется несколькими ключевыми факторами. Во-первых, стремительное развитие частной космонавтики и возросший интерес крупных технологических компаний к проектам освоения космоса создают реальные предпосылки для практической реализации концепций космических поселений в обозримом будущем. Во-вторых, прогресс в области материаловедения, в частности разработка углеродных нанотрубок и графеновых композитов, открывает новые возможности для создания конструкций, способных выдерживать экстремальные нагрузки космической среды. В-третьих, накопленный опыт эксплуатации Международной космической станции предоставляет ценные данные о функционировании замкнутых систем жизнеобеспечения и психологических аспектах длительного пребывания человека в изолированных космических средах.

Научная проблема заключается в недостаточной проработке комплексного подхода к проектированию орбитальных мегаструктур, интегрирующего инженерно-технические требования с архитектурно-психологическими потребностями будущих обитателей. Существующие исследования преимущественно фокусируются на отдельных аспектах проблемы — конструктивных решениях, системах жизнеобеспечения или социологических вопросах — без формирования целостной концептуальной модели проектирования.

Объект исследования — процессы проектирования и строительства крупномасштабных орбитальных поселений типа цилиндров О'Нила.

Предмет исследования — архитектурные и инженерные проблемы создания автономных космических сред обитания с искусственной гравитацией.

Цель исследования — выявление и систематизация ключевых архитектурных и инженерных проблем проектирования цилиндров О'Нила с разработкой концептуальных подходов к их решению.

Задачи исследования:

1. Провести анализ эволюции концепции цилиндров О'Нила и современного состояния исследований в области космической архитектуры.
2. Систематизировать основные инженерные проблемы строительства орбитальных мегаструктур, включая требования к конструктивным материалам, системам защиты и жизнеобеспечения.

3. Разработать концептуальную модель человекоцентричной архитектуры мегаструктур, учитывающую психологические потребности обитателей.

Научная новизна исследования заключается в формулировании концепции «чело́векоцентричной архитектуры мегаструктур», которая рассматривает психологическое благополучие обитателей как ключевой фактор проектирования, обеспечивающий баланс между масштабом инженерных решений и интимными потребностями человека в комфортной среде обитания.

Практическая значимость определяется возможностью использования результатов при разработке технических заданий для перспективных проектов космических поселений, формировании исследовательских программ в области космической архитектуры и подготовке специалистов в данной области.

Методы и материалы

Теоретико-методологическую базу исследования составляют фундаментальные работы в области космической архитектуры и инженерии космических систем. Концепция цилиндров О'Нила базируется на оригинальных исследованиях Джерарда О'Нила, опубликованных в журнале *Physics Today* в 1974 году и развитых в монографии «*The High Frontier: Human Colonies in Space*» 1976 года [1]. Следует отметить, что идеи крупномасштабных вращающихся космических поселений имеют более раннюю историю: учёные Герман и Оберт описали концепцию обитаемых вращающихся цилиндров в своей работе «*Menschen im Weltraum*» ещё в 1954 году [2; 3].

В качестве методов исследования использовались: систематический анализ научной литературы по космической архитектуре и инженерии; сравнительный анализ различных концепций орбитальных поселений; системный подход к выявлению взаимосвязей между инженерными и архитектурными аспектами проектирования; метод экспертных оценок для определения приоритетности технических проблем.

Информационную базу исследования составили научные публикации в журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, материалы конференций International Conference on Environmental Systems (ICES), отчёты NASA по системам жизнеобеспечения, а также аналитические материалы National Space Society. Особое внимание уделялось работам последних лет, отражающим современное состояние исследований в области материаловедения, в частности разработки углеродных нанотрубок для аэрокосмических применений.

Для анализа инженерных параметров цилиндров О'Нила использовались расчётные данные оригинальной концепции Island Three, предполагающей создание двух контрвращающихся цилиндров диаметром 6,4–8 км и длиной до 32 км. Параметры искусственной гравитации анализировались на основе уравнения центростремительного ускорения $a = v^2/r$, позволяющего определить необходимую скорость вращения конструкции для имитации земной гравитации.

Результаты и обсуждение

Анализ концепции цилиндров О'Нила позволил выявить комплекс взаимосвязанных инженерных и архитектурных проблем, решение которых определяет техническую реализуемость проекта. Структурно данные проблемы могут быть классифицированы на три основные группы: проблемы конструктивной целостности и материаловедения, проблемы систем жизнеобеспечения и защиты, а также проблемы архитектурно-психологического характера.

Проблемы конструктивной целостности и материаловедения

Первичной и наиболее фундаментальной инженерной проблемой является обеспечение структурной целостности конструкции при воздействии колоссальных ротационных и атмосферных нагрузок. Для создания искусственной гравитации, эквивалентной земной, цилиндр диаметром 8 км должен совершать примерно 28 оборотов в час, что соответствует угловой скорости 2,8 градуса в секунду. При таких параметрах вращения внутренние стенки конструкции испытывают значительные центробежные нагрузки, требующие применения материалов с исключительно высоким соотношением прочности к массе.

Если в оригинальной концепции О'Нила предполагалось использование стали, современные исследования ориентируются на перспективные материалы — углеродные нанотрубки, графеновые композиты и нанотрубки нитрида бора. Согласно данным исследований, опубликованных в журнале ACS Applied Nano Materials в 2023 году, углеродные нанотрубки демонстрируют потенциал значительного улучшения прочностных характеристик композитных материалов для аэрокосмических применений [4]. Однако переход от лабораторных образцов к промышленному производству конструктивных элементов остаётся нерешённой задачей [5].

Таблица 1

Сравнительные характеристики материалов для строительства орбитальных мегаструктур

Материал	Прочность на разрыв (ГПа)	Плотность (г/см³)	Уровень технологической готовности
Высокопрочная сталь	0,5–2,0	7,8	Промышленное производство
Углепластик (CFRP)	1,5–3,5	1,5–1,8	Серийное аэрокосмическое применение
Углеродные нанотрубки (CNT)	50–150	1,3–1,4	Лабораторные исследования
Графеновые композиты	100–130	1,0–2,0	Экспериментальные образцы

Источник: составлено автором на основе анализа материалов

Отдельную проблему представляет обеспечение сырьевой базы для строительства (табл. 1). Транспортировка материалов с поверхности Земли экономически нецелесообразна из-за высокой стоимости выведения на орбиту. О'Нил предлагал использовать ресурсы Луны и астероидов, доставляемые посредством электромагнитных ускорителей массы. Современные исследования Университета Рочестера демонстрируют возможность использования реголита астероидов, укреплённого углеродными нанотрубками, для создания строительных материалов с прочностью, сопоставимой с гранитом [6].

Проблемы систем жизнеобеспечения и защиты

Создание автономной системы жизнеобеспечения для населения в несколько миллионов человек представляет собой задачу беспрецедентной сложности. Согласно материалам конференции ICES 2024, современные системы ECLSS (Environmental Control and Life Support Systems), используемые на МКС, требуют регулярного пополнения расходных материалов и не

обеспечивают полностью замкнутого цикла [7]. Для цилиндров О'Нила необходимо создание интегрированной биорегенеративной системы, способной обеспечивать полную рециркуляцию воздуха, воды и питательных веществ [8].

Концепция «мини-биосферы» предполагает создание сбалансированной экосистемы, включающей растительные культуры для производства кислорода и продовольствия, системы очистки воды и переработки отходов. Однако, как показали эксперименты проекта Biosphere 2, достижение устойчивого равновесия в искусственных экосистемах крайне затруднительно — небольшие нарушения могут приводить к каскадным последствиям, угрожающим жизнеспособности всей системы [9].

Защита от космической радиации и микрометеоритов требует создания многослойной оболочки значительной толщины. О'Нил предлагал использовать слой лунного реголита толщиной несколько метров, что существенно увеличивает массу конструкции и усложняет задачу обеспечения структурной целостности при вращении. Современные исследования рассматривают альтернативные подходы, включая использование полых астероидов в качестве естественной защитной оболочки или создание двухслойных конструкций с внешним не вращающимся защитным кожухом.

Таблица 2

Основные параметры системы жизнеобеспечения цилиндра О'Нила

Параметр	Значение	Примечание
Состав атмосферы (O ₂ /N ₂)	20%/30%	~50% земного давления
Потребление O ₂ на человека	0,84 кг/сутки	По данным NASA
Потребление воды на человека	2,5–3,0 л/сутки	Включая технические нужды
Требуемый уровень рециркуляции	>95%	Для автономности
Площадь с/х угодий на человека	50–100 м ²	Интенсивное земледелие

Источник: составлено автором на основе анализа материалов NASA и ICES

Архитектурно-психологические проблемы

Внутренняя архитектура цилиндра О'Нила представляет собой уникальный вызов, не имеющий аналогов в истории проектирования (табл. 2). Создание стабильного и психологически комфортного ландшафта внутри вращающейся криволинейной конструкции требует принципиально нового подхода к организации пространства. Рельеф местности, включая холмы, долины и водоёмы, должен быть спроектирован с учётом поддержания стабильного центра масс во избежание дестабилизирующих эффектов.

Особую проблему представляет эффект Кориолиса — при недостаточном радиусе вращения жители могут испытывать головокружение и тошноту при движении. Исследования показывают, что при радиусе 4 км и скорости вращения 28 оборотов в час большинство людей не будет испытывать значительного дискомфорта, хотя эффект отклонения движущихся объектов и ощущение «спинварда» и «антиспинварда» при повороте головы сохранятся.

Визуальное восприятие пространства в цилиндре радикально отличается от земного опыта: «небо» представляет собой структурный элемент конструкции, а «горизонт» загибается вверх. Это требует переосмысления принципов градостроительного планирования и создания архитектурных решений, использующих уникальную геометрию пространства вместо попытки её замаскировать. Интерьер должен включать зоны различного функционального назначения — городские центры, сельскохозяйственные угодья и природные территории — организованные в единую непрерывную линейную структуру.

Имитация естественного суточного цикла предполагается посредством системы подвижных зеркал, отражающих солнечный свет внутрь конструкции через прозрачные окна,

чередующиеся с обитаемыми зонами. Данное решение требует высокоточных механизмов позиционирования и системы управления освещением для создания естественных циклов день-ночь, необходимых для психологического благополучия обитателей.

Концепция человекоцентричной архитектуры мегаструктур

На основе проведённого анализа автором формулируется концепция «чело­векоцентричной архитектуры мегаструктур», которая рассматривает психологические и социальные потребности обитателей как приоритетный фактор проектирования, определяющий инженерные решения, а не адаптирующийся к ним. Данный подход предполагает, что техническая задача создания «машины для жизни» должна быть подчинена более высокой цели — формированию подлинного дома, способного поддерживать процветающее общество под искусственным, но обнадёживающим небом.

Ключевые принципы концепции включают: приоритет психологического комфорта при определении геометрических параметров конструкции; создание разнообразных пространственных сред, обеспечивающих как приватность, так и возможности социального взаимодействия; интеграцию природных элементов в искусственную среду; гибкость планировочных решений, допускающих адаптацию к изменяющимся потребностям сообщества [10–13]

Выводы

Проведённый анализ архитектурных и инженерных проблем проектирования цилиндров О'Нила позволяет сформулировать следующие ключевые выводы.

Теоретические основы концепции цилиндров О'Нила, базирующиеся на использовании центробежной силы для создания искусственной гравитации, остаются физически обоснованными. Однако практическая реализация требует решения комплекса взаимосвязанных технических проблем, выходящих за рамки отдельных инженерных дисциплин.

Ключевой проблемой материаловедения является переход от лабораторных образцов перспективных материалов, в частности углеродных нанотрубок, к промышленному производству конструкционных элементов требуемых размеров и характеристик. Параллельно необходимо развитие технологий добычи и переработки внеземных ресурсов для обеспечения сырьевой базы строительства.

Создание полностью замкнутых биорегенеративных систем жизнеобеспечения для миллионов обитателей остаётся нерешённой задачей. Современный уровень технологий ECLSS, апробированных на МКС, не обеспечивает полной автономности и требует качественного скачка для масштабирования к параметрам орбитальных мегаструктур.

Разработанная концепция «чело­векоцентричной архитектуры мегаструктур» акцентирует необходимость рассмотрения психологического благополучия обитателей как приоритетного фактора проектирования. Архитектурная задача создания комфортной среды обитания в уникальных условиях вращающейся криволинейной конструкции представляет собой не менее сложный вызов, чем инженерное обеспечение функционирования систем.

В целом путь к строительству цилиндров О'Нила представляет собой не единичную инженерную задачу, а многопоколенческий проект, способный определить новую эпоху развития человеческой цивилизации. Реализация данного проекта требует синергетической конвергенции прорывов практически во всех областях науки и техники, при этом наиболее значимым вызовом, возможно, является именно архитектурный — успешное сочетание масштабных инженерных требований с деликатными, нюансированными потребностями человеческой психологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. O'Neill G.K. The Colonization of Space / G.K. O'Neill — DOI: 10.1063/1.3128863 // Physics Today. — 1974. — Т. 27, № 9. — С. 32–40.
2. O'Neill G.K. The High Frontier: Human Colonies in Space / G.K. O'Neill. — New York: William Morrow, 1976. — 288 с.
3. Oberth H. Menschen im Weltraum: Neue Projekte für Raketen- und Raumfahrt [Люди в космосе: новые ракетно-космические проекты] / H. Oberth. — Düsseldorf: Econ-Verlag [Дюссельдорф: Издательство Econ], 1954. — 216 с.
4. Evers C.E. Scalable High Tensile Modulus Composite Laminates Using Continuous Carbon Nanotube Yarns for Aerospace Applications / C.E. Evers, B. Vondrasek, C.N. Jolowsky et al. — DOI: 10.1021/acsnm.3c01266 // ACS Applied Nano Materials. — 2023. — Т. 6, № 13. — С. 11260–11268
5. Alvarez N.T. Carbon nanotube assembly and integration for applications / N.T. Alvarez, P. Miller, M. Hasse et al. — DOI: 10.1016/j.carbon.2015.01.057 // Carbon. — 2015. — Т. 86. — С. 350–357.
6. Miklavčič P.M. Habitat Bennu: Design Concepts for Spinning Habitats Constructed From Rubble Pile Near-Earth Asteroids / P.M. Miklavčič, J. Siu, E. Wright et al. — DOI: 10.3389/fspas.2021.645363 // Frontiers in Astronomy and Space Sciences. — 2022. — Т. 8. — С. 645363
7. Weinersmith K. Review of «A City on Mars» / K. Weinersmith, Z. Weinersmith // The Space Review. — 2023. — Parts I–III. — URL: <https://thespacereview.com/article/4690/1>
8. Bagdigian R.M. International Space Station Environmental Control and Life Support System Mass and Crewtime Utilization in Comparison to a Long Duration Human Space Exploration Mission / R.M. Bagdigian, J. Dake, G. Gentry, M. Gault // 45th International Conference on Environmental Systems. — Bellevue, 2015. — С. 808–820.
9. Zecchi S.A Concise Review of Recent Advancements in Carbon Nanotubes for Aerospace Applications / S. Zecchi, G. Cristoforo, E. Piatti et al. — DOI: 10.3390/mi16010053 // Micromachines. — 2024. — Т. 16, № 1. — С. 53
10. Roy A. An updated review on carbon nanomaterials: Types, synthesis, functionalization and applications, degradation and toxicity / A. Roy, A. Gupta, B. Haque et al. — DOI: 10.1515/gps-2024-0150 // Green Processing and Synthesis. — 2024. — Т. 13, № 1. — С. 20240150.
11. Крючков Б.И. Освоение человеком экстремальной среды обитания / Б.И. Крючков, В.М. Усов // Воздушно-космическая сфера. — 2019. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osvoenie-chelovekom-ekstremalnoy-sredy-obitaniya>
12. Stambaugh I. Environmental Controls and Life Support System (ECLSS) Design for a Multi-Mission Space Exploration Vehicle / I. Stambaugh, R. Lewis, M. Perchonok — DOI: 10.2514/6.2013-3428. // 43rd International Conference on Environmental Systems. — Vail, 2013.
13. Skran D.A Critique of «A City on Mars» and Other Writings Opposing Space Settlement / D. Skran // Space Settlement Journal. — 2024. — Т. 1. — С. 1–90.

Alpire Guerrero Marcelo

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia
E-mail: 1042235048@rudn.ru

Gorodova Margarita Nikolaevna

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia
E-mail: gorodova-mn@pfur.ru

O'Neill Cylinders: Architectural and Engineering Challenges of Designing Orbital Megastructures for Long-Term Human Habitation in Space

Abstract. This study provides a comprehensive analysis of the architectural and engineering challenges associated with the design and construction of O'Neill cylinder-type orbital megastructures for long-term human habitation in space. The relevance of the topic is determined by the growing interest of the global scientific community in space colonization issues and the need to develop conceptual foundations for designing large-scale space settlements. The research subject encompasses engineering-technical and architectural-planning solutions necessary for creating autonomous orbital habitats with artificial gravity. The study employs systematic analysis of technical requirements for structural materials, methods for creating artificial gravity through rotation, closed-loop life support systems, and psychological aspects of living in enclosed artificial ecosystems. Special attention is devoted to problems of structural integrity under rotational and atmospheric loads, protection from cosmic radiation and micrometeoroids, and creation of a psychologically comfortable living environment. The research results indicate the necessity of an interdisciplinary approach to space settlement design, integrating achievements in materials science, robotics, environmental engineering, and architectural psychology. The scientific novelty lies in systematizing contemporary approaches to solving engineering challenges of orbital megastructure construction and formulating the concept of «human-centric megastructure architecture» that considers inhabitants' psychological needs as a priority design factor. Practical significance is determined by the possibility of using results in developing specifications for prospective space settlement projects and forming research programs in space architecture.

Keywords: O'Neill cylinder; space architecture; orbital megastructures; artificial gravity; closed-loop life support systems; space colonization; carbon nanotubes; human-centric design