

УДК 629.786

Подбор конструкционных материалов для долговременной обитаемой базы в атмосфере Венеры

Майорова Виктория Ивановна

Игрицкий Владимир Александрович

Каменева Вероника Андреевна

Логинова Анна Алексеевна

Возиянова Владислава Владимировна

igritsky_v_a@mail.ru

vkameneva@bmstu.ru

anna03.loginova@yandex.ru

voziyanovavv@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены вопросы выбора наиболее подходящих по свойствам материалов для обитаемого комплекса, находящегося в атмосфере Венеры, предназначенного для долговременного использования. Рассматриваемый проект выполнен в рамках Международной молодежной научной школы «Исследование космоса: теория и практика-2025» (SDTP-2025) и включает в себя вопросы оценки существующих конструкционных материалов, анализ их пригодности в условиях венерианских атмосферы. Определены основные необходимые требования к материалам исходя из условий эксплуатации станции.

Ключевые слова: долговременная обитаемая база, атмосфера Венеры, конструкционные материалы, пилотируемый комплекс, орбитальная станция, долговременные миссии

Одной из тенденций развития современной космонавтики является планирование долгосрочных миссий по изучению Венеры и ее атмосферы. Экстремальные условия на поверхности Венеры и в ее атмосфере делают непригодными традиционные инженерные решения, требуя принципиально новых подходов к проектированию. Ключевой целью для обеспечения жизнеспособности такой станции является комплексный подбор специализированных конструкционных материалов, поскольку от этого напрямую зависит успех всей миссии. Данная работа посвящена определению ключевых требований и анализу современных и перспективных материалов, способных выдержать длительное воздействие венерианской атмосферы. Долговременная обитаемая база в атмосфере Венеры позволит обеспечить выполнение широкого спектра актуальных задач: от исследования поверхности и атмосферы Венеры до создания условий для долговременного пребывания людей на станции.

В рамках Международной молодежной научной школы «Исследование космоса: теория и практика-2025» (SDTP-2025), проведенной в гибридном формате Учебно-научным молодежным космическим центром МГТУ им. Н.Э. Баумана, выполнен междисциплинарный коллективный научно-технический проект «Долговременная обитаемая база в атмосфере Венеры» с целью разработки долговременной обитаемой базы (на 3-6 человек сроком на пол года) в атмосфере Венеры с учетом следующих факторов: реализации выхода на поверхность Венеры, использования технологии дирижаблей для

организации базы, использования тросовой системы для удержания дирижабля на заданной высоте над поверхностью Венеры, использования робототехнических средств на поверхности Венеры.

Первостепенно был разработан общий план миссии: установка платформы для закрепления троса и дирижабля, раскрытие дирижабля и установка троса на фиксированную платформу, стыковка и расстыковка модулей, кораблей и дополнительных разгонных блоков, использование лифта для спуска на поверхность Венеры.

Предлагаемая конструкция основного элемента базы, дирижабля, является сборной крупногабаритной конструкцией и состоит из полотна дирижабля, ферменных конструкций, солнечных батарей, жилого комплекса, пропеллеров и органов управления. Жилой комплекс состоит из 9 модулей. Модульная система всего комплекса позволяет изменять и дорабатывать его структуру. Для удержания дирижабля был выбран трос с якорной системой. Для доставки экипажа из трех человек был разработан взлетно-посадочный пилотируемый аппарат.

Для подбора материалов оболочки и конструкции дирижабля был проведен обзор существующих концептов и проектов миссий в атмосфере Венеры, сбор информации о характеристиках атмосферы Венеры. В качестве места якорения были выбраны горы Максвелла высотой 10–11 км. Одними из наиболее важных критериев при подборе материалов стали характеристики атмосферы. У поверхности Венеры температура достигает 460 °С, давление 92 бар, атмосфера состоит на 96 % из углекислого газа на 3 % из азота. Такие параметры обусловлены парниковым эффектом различных газов, входящих в атмосферу, и облаками серной кислоты, находящимися на высоте более 50 км. При этом на высоте 50–55 км характеристики принимают следующие значения: температура 20 °С, давление 1 бар. В этих условиях и планировалось расположение долговременной обитаемой базы [1–3].

Поскольку основной задачей было минимизировать массу как оболочки, так и конструкции, то выбор пал на композитные материалы, поскольку только они способны удовлетворить всем вышеупомянутым характеристикам [4].

В начале были проработаны материалы для удерживающего троса. В качестве схемы компоновки был выбран семипрядный трос двойной свивки. Такая схема равномерно распределяет нагрузку, что повышает долговечность в том числе при экстремальных условиях. Сердцевина троса — волокна полипарафениленбензоксазола (РВО). Волокно РВО представляет собой разновидность композитного армированного материала, разработанного Соединенными Штатами в 1980-х годах для развития аэрокосмической промышленности. Он является одним из наиболее перспективных представителей семейства полиамидов, содержащих гетероциклическую ароматическую группу. Его физические и химические свойства полностью превосходят свойства кевларового волокна, которое занимает лидирующие позиции в области высокопроизводительных волокон. Покрытие троса — антифрикционное покрытие на основе дисульфида молибдена, обеспечивает высокую термостойкость, снижение трения, уменьшение износа [5].

Для оболочки было принято решение использовать двухслойную композицию, тем самым повысив герметичность и долговечность. Наиболее подходящим для материала оболочки оказался материал на основе прочных волокон РВО, уже упомянутых выше, поскольку он обладает наилучшим сочетанием высокой прочности и низкой плотности, а, значит, и сравнительно небольшой массы. Оболочка должна покрываться снаружи пятислойным покрытием из металлизированной пленки политетрафторэтилена (ПТФЭ) для защиты от воздействий серной кислоты и должна сохранять стойкость при нагреве до 135 °С [6].

В качестве материала для изготовления ферменных конструкций было принято решение использовать алюминиевый сплав АМгб. Для упрочнения в узлах предпочтительно использовать нержавеющую сталь. Сплав АМгб сочетает высокую прочность с хорошей пластичностью, что делает его востребованным материалом для конструкций, работающих под нагрузкой, в том числе ударной при раскрытии дирижабля. Он обладает отличной свариваемостью всеми распространенными методами (включая аргонодуговую и контактную сварку) без склонности к образованию трещин.

Была выполнена комплексная работа над проектом, рассматривающая массу аспектов, влияющих на подбор материалов, были проанализированы все поставленные задачи. Проведенный анализ показывает, что ни один материал в отдельности не может в полной мере противостоять совокупности экстремальных факторов, что делает наиболее перспективным путь создания многослойных композитов и гибридных структур. Ключевыми кандидатами стали композит на основе волокон РВО, сплав АМгб. Дальнейшие исследования должны быть сфокусированы на испытаниях в условиях, максимально приближенных к венерианским, включая воздействие сернокислотной атмосферы под высоким давлением.

Список источников

- [1] Седых О.Ю., Сысоев В.К., Ткаченко А.И., Хмель Д.С. *Аналитический обзор разработок аэростатических зондов для Венеры*. Москва, НПО им. С.А. Лавочкина, 2024.
- [2] Хмель Д.С. *Методика определения параметров движения управляемых аэростатических зондов для исследования планеты Венера*. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2024, 120 с.
- [3] *High Temperature Materials for Venus Balloon Envelopes*. URL: <https://dataverse.jpl.nasa.gov/file.xhtml?fileId=31561&version=2.0> (accessed 15.11.2025).
- [4] *Evaluation of Materials for Venus Aerobot Applications*. URL: <https://dataverse.jpl.nasa.gov/file.xhtml?fileId=23857&version=2.0> (accessed 15.11.2025).
- [5] *Pro fiber Zylon*. URL: <https://imattec.com/brochures/technical-information-pbo.pdf> (accessed 15.11.2025).
- [6] *High Altitude Venus Operational Concept (HAVOC): Proofs of Concept*. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160006580/downloads/20160006580.pdf> (accessed 15.11.2025).