

УДК 629.78

Обзор технологий разворачиваемых надувных конструкций и их отверждаемого композитного армирования

Галиновский Андрей Леонидович

galcomputer@mail.ru

SPIN-код: 2657-3929,

Scopus Author ID: 294194,

ORCID: 0000-0001-8878-4839

Верховцев Федор Васильевич

vfv22m221@student.bmstu.ru

Самойленко Николай Валерьевич

snv22m513@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В настоящее время прослеживается тенденция стремительной интеграции надувных конструкций в производство космических аппаратов, начиная с антенн космических спутников и заканчивая модулями космических станций. Многие зарубежные коммерческие компании космической отрасли (Blue Origin, Bigelow Aerospace, Sierra Space, Axiom Space и др.) ведут проекты по созданию частных орбитальных станций, в состав которых войдут надувные жилые модули, инженерами из МГТУ предложен вариант использования надувных антенн для сверхмалых спутников, что можеткратно увеличить Internet-покрытие. На ряду с подобными проектами проводятся исследования в области внедрения в надувные конструкции отверждаемого композитного каркаса для повышения их жесткости: ведутся исследования и поиск новых препрегов и связующих, изучается влияние космического излучения на старения материала композитного каркаса, развиваются технологии горячего формования в условиях орбиты.

Ключевые слова: надувная космическая антенна, разворачиваемые конструкции, нано-спутники, композитный каркас, препрег, пленочная инфузия, горячее формование, реакционная смесь, вязкость, отверждение

Deployable inflatable structures and their curable composite reinforcement: a technology review

Galinovskiy Andrey Leonidovich

galcomputer@mail.ru

SPIN-code: 2657-3929

Scopus Author ID: 294194

ORCID: 0000-0001-8878-4839

Verkhovtsev Fyodor Vasilyevich

vfv22m221@student.bmstu.ru

Samoylenko Nikolai Valeryevich

snv22m513@student.bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The article presents the results of a review of applications for deployable inflatable structures in the aerospace industry and an analysis of publications on their curable composite reinforcement. Currently, there is a clear trend toward rapid integration of inflatable structures into spacecraft manufacturing, ranging from satellite antennas to space

station modules. Many foreign commercial aerospace companies (Blue Origin, Bigelow Aerospace, Sierra Space, Axiom Space, etc.) are working on projects to develop private orbital stations, which will include inflatable habitation modules. Engineers at MIT have proposed using inflatable antennas for small satellites, which could dramatically expand Internet coverage. Alongside such projects, research is being conducted on integrating curable composite frameworks into inflatable structures to improve their rigidity. This includes: studies and development of new prepregs and binders, investigation of space radiation effects on the aging of composite framework materials, advancements in in-orbit hot-forming technologies.

Keywords: *inflatable space antenna, deployable structures, nanosatellites, composite framework, prepreg, film infusion, hot forming, reactive mixture, viscosity, curing*

Введение. Освоение космического пространства с самого начала являлось двигателем развития технологий во множестве отраслей промышленности при- нуждало к использованию новых материалов и совершенствованию научных подходов. Из-за высокой ресурсозатратности одним из первых принципов изготовления космических аппаратов является рациональность конструкции и оптимизация архитектуры. При этом проектирование спутников, космических кораблей и орбитальных станций требует соблюдения массогабаритных рамок и плотной компоновки всех систем из-за ограниченной возможности средств выведения. В таких условиях развертывание или строительство крупногабаритных конструкций в открытом космосе осложняется дороговизной доставки их на целевые орбиты. Вследствие этого на сегодняшний день нельзя наблюдать большие орбитальные станции, отличающиеся просторностью и масштабами, отсылающие своим видом к работам множества фантастов начала XX века. Невозможность создания таких конструкций является основной причиной постоянного поиска альтернативных разработок в области развертываемых надувных конструкций, доставляемых на орбиту в сложенном виде.

Массогабаритные ограничения современных ракет-носителей по части выводимого на орбиту полезного груза ставят производство ракетно-космической техники в узкие рамки, ограничивают мощность космических антенн и спутников и сокращают до минимума рабочее пространство космонавтов на космических станциях. Развертывание надувных конструкций является перспективным направлением космической техники, способное преодолеть эти ограничения и частично перенести производство ракетно-космической техники на орбиту. В свою очередь, армирование и формование композитных каркасов после этапа развертывания в космосе увеличит жесткость и прочность конструкций.

Цель работы — исследование состояния и степени развития технологий в области развертываемых надувных конструкций и их отверждаемого композитного армирования.

Задачи:

– изучить опыт создания надувных космических антенн и модулей космических станций;

– проанализировать современные исследования в области композитного армирования надувных конструкций [1–9].

Опыт создания космических надувных конструкций. Первый случай применения такого рода конструкции можно отнести к полету советских космонавтов А.А. Леонова и П.И. Беляева на корабле Восход-2 в 1965 году [1]. Надувная шлюзовая камера, предназначенная для первого в истории выхода человека в открытый космос, из сложенного состояния переходила в рабочее, удлиняясь с 77 см до 2,5 м.

После 1965-го года были созданы различные концепты как обитаемых надувных модулей орбитальных станций, так и надувных лунных жилищ. Особого внимания заслуживает советский проект долговременной лунной базы «Звезда», разрабатываемый в СССР в период 1962 по 1974 гг. [2]. Проект заключался в посадке на Луну порядка девяти жилых модулей в виде сложенных гофрированных металлических оболочек сферической и цилиндрической формы, способных расширяться при подаче внутреннего давления с 4,5 до 8,6 м. Лунные модули рассчитывались специалистами конструкторского бюро ОКБ-1 на приблизительный срок службы до пяти лет.

На ряду с советскими проектами существовали и другие варианты КНК в США, такие как TransHub [3]. В 1990-е разрабатывался надувной обитаемый модуль для американского сегмента МКС для отработки возможностей подобных технологий в космосе и дальнейшей перспективы использования в межпланетном полете. Конструктивно модуль состоял из жесткого цилиндрического композитного каркаса из углепластика диаметром 3 м и длиной 7 м, подходящего для выведения на орбиту в грузовом отсеке шаттла, и многослойной оболочки надуваемой до диаметра 8 м. Проект был доведен до стадии вакуумных и температурных испытаний, была проверена микрометеоритная защита. По политическим и экономическим причинам проект надувного модуля пришлось отменить в начале 2000-ых.

В первую очередь большее распространение надувные разворачиваемые конструкции нашли не в орбитальных станциях, а в различных исследовательских антеннах, навигационных спутниках и спутниках связи. Принимающая способность зеркальных антенн увеличивается с ростом площади апертуры рефлектора. Применение оболочковых надувных антенн может значительно увеличить эту площадь, при этом уменьшить величину их погонной массы (массы рефлектора, отнесенной к площади апертуры), как показателя эффективности и экономичности спутников [4].

Дополнительное развитие подобным идеям дала программа Echo (1956–1964 гг. США) по суборбитальным аэростатам, выполняющим роль пассивных ретрансляторов [5]. Они представляли собой примитивные сферические спутники с тонкой надувной металлизированной оболочкой диаметром более 30 м, настолько подверженной эффекту «солнечного паруса», что в процессе реальных испытаний фиксировалась значительная деградация орбиты. Процесс надувания обеспечивался сублимацией порошкообразного реагента. В 1996 году были попытка разворачивания антенны со значительно большей

апертурой: миссия шаттла STS-77 в рамках эксперимента IAE (Inflatable Antenna Experiment) фирмы L'Garde [6]. Конструкция значительно отличалась: рефлектор диаметром 14 м разворачивался вследствие надувания кольцевой оболочки, которая крепилась к спутнику тремя надувными балками длиной 28 м. Развертывание прошло успешно, но по непредвиденным причинам конечное положение спутника оказалось неточным.

Технология разворачиваемых надувных космических конструкций появилась более 50-ти лет назад, на протяжении всех этих лет всегда существовали перспективные проекты, некоторые из которых, на примере космических антенн, дошли до этапа реализации, а некоторые завершили свое существование на стадии эскизов или первичных испытаний. В настоящее время освоение космоса становится все доступнее с появлением большого количества коммерческих космических компаний, среди которых эта технология набрала большую популярность — проекты частных орбитальных станций с надувными модулями имеют финансирование и активно развиваются. Технология надувных конструкций привлекает коммерческие компании своим оригинальным подходом к выделению дополнительного свободного места для работы и хранения оборудования.

Американская компания Bigelow Aerospace в 2016 г. успешно развернула надувной активный модуль BEAM, используемый для складирования оборудования на борту МКС. Модуль позволил снизить загруженность и перераспределить занятое место на станции. В оболочку модуля вошли слои защиты от солнечной и космической радиации, орбитального мусора, атомарного кислорода, ультрафиолетового и других видов излучения [7]. Образованная в 2021 г. компания Sierra Space проводит испытания на разрыв надувной оболочки для будущей первой коммерческой орбитальной станции LIFE Habitat (Large Integrated Flexible Environment) [8].

Анализ современных исследований и публикаций. Особенно перспективным стало применение надувных конструкций с отверждаемым каркасом в нано-спутниках, таких как CubeSat. Их малые габариты и масса, с одной стороны, делают их более доступными, но, с другой, ограничивают энергетические возможности и передачу сигнала. Разворачиваемые надувные антенны теоретически могут кратно увеличить как предельное расстояние передачи сигнала, так и площадь покрытия. Так, в Массачусетском технологическом институте (MIT) была спроектирована надувная антенна с параболическим рефлектором [6]. Механизм разворачивания, аналогичный программе Echo: сублимация порошкового реагента под действием разности давлений. Подобные спутники могут стать самым экономичным подходом к обеспечению связи.

Наряду с безусловными преимуществами в компактности, высокой эффективности и небольшой массе надувные космические антенны обладают парой принципиальных недостатков, влияющих на их долговечность, точность и маневренность. В первую очередь, стоит отметить подверженность таких конструкций влиянию микрометеороидов, пробитие оболочки которыми приведет к потере давления, изменению формы рефлектора и появлению

складок на оболочке. Это может быть частично скомпенсировано наличием резервного количества реагента, сублимация которого продлит срок жизни спутника поддержанием давления при незначительной утечке газа. Также отклонение от заданного профиля может произойти вследствие теплового расширения газа внутри оболочки, что может наблюдаться с изменением температурного режима по мере обращения спутника вокруг Земли с заходом и выходом из тени планеты.

Еще одним опасным фактором, влияющим на работоспособность спутников с надувными антеннами, является их пространственная устойчивость. Большая площадь развертывания рефлектора может послужить возникновению сил как со стороны солнечного ветра, так и со стороны остатков разреженной атмосферы на низкой околоземной орбите. По мере увеличения «парусности» рефлектора уменьшается возможность полного контроля положения и параметров орбиты системами ориентации, представленными на кубсатах маховиками и магнитными катушками.

Решением проблемы зависимости от постоянного внутреннего давления газа может послужить внедрение в конструкцию надувной оболочки композитного каркаса, отверждение которого происходит после завершения процесса выведения и развертывания. Этот подход способен исключить изменение формы рефлектора и увеличить прочностные характеристики всей конструкции. Наличие жесткого отверждаемого каркаса подразумевает необходимость поиска оптимальной конфигурации силовых элементов, выбора материалов матрицы и наполнителя, обеспечивающих заданную надежность, сохраняемость и долговечность, при минимальных затратах.

Условия формования композитов в среде космического пространства настолько уникальны, что по заявлению многих специалистов никогда не получится достичь их полной симуляции в лабораторных условиях. Перспективы применения отверждаемых в условиях космоса композитных материалов сопровождаются соответствующими исследованиями и испытаниями образцов на различных высотах с помощью аэростатов в условиях действия широкого спектра факторов, например ионизирующего солнечного излучения, пониженного давления, перепада температур, комбинации которых довольно сложно добиться в лабораторных условиях. Так Л.А. Комар из Института механики сплошных сред УрО РАН вместе с коллегами из Пермского государственного национального исследовательского университета [7], взяв за основу прототип надувной антенны из MIT, проверяли возможность применения композитного каркаса, выполненного из полосок препрега. Часть исследования была выделена под оценку изменения вязкости с течением времени при различных температурах хранения реакционных смесей эпоксидной смолы ЭД-20 с различными отвердителями. Этот показатель играет важную роль в сохраняемости смеси в период между укладкой композита и моментом развертывания, при высокой степени вязкости может возникнуть опасность нераскрытия каркаса из-за увеличения его жесткости в сложенном виде. Сама химическая реакция отверждения данных смесей протекает при температуре

150 °С, соответствующей температурному режиму на орбите. Практическая часть исследования заключалась в исследовании старения и сравнении жесткости двух партий образцов полиамидного препрега, одна из которых совершала полет на аэростате на высоту до 30 км и подвергалась воздействию космического излучения, а другая являлась контрольной и хранилась в холодильнике. Партии подвергались эксперименту на трехточечный изгиб. Было выявлено увеличение жесткости полетных образцов на 23–25 % по сравнению с контрольными, что может быть следствием роста количества центров-инициаторов реакции отверждения в условиях стратосферного полета.

Как было сказано ранее, для композитных оболочковых конструкций, развертываемых внутренним давлением, важную роль в поддержании работоспособности играет низкий уровень полимеризации композита на этапе хранения перед развертыванием. Этот показатель влияет на величину давления наддува оболочки: чем выше вязкость связующего, тем выше жесткость оболочки и тем большим давлением необходимо нагружать конструкцию для ее полного развертывания. О стремительном возрастании вязкости по истечению определенного срока хранения также пишет В.Г. Гилев с соавторами из ПГНИУ [8]. В качестве исследовательской установки выступала специальная надувная цилиндрическая камера, выполненная из композитного препрега, а жесткость с течением времени косвенно оценивалась величиной нагружающего внутреннего давления, которое приводило профиль камеры в полностью круглую форму.

Помимо применения отверждаемых композитных конструкций в космических антеннах ведутся разработки и исследования в области создания космических жилых и складских модулей и оранжерей, выполненных из сплошной отверждаемой композитной полимерной оболочки. Подобная технология сможет исключить уязвимость надувных станций к проколам оболочки и снизит влияние внутреннего давления на форму конструкции. Так, у подобных конструкций появится возможность к полной разгерметизации без потери формы. В свое время именно это сподвигло руководство NASA отказаться от проекта Erectable Torus Manned Space Laboratory, предполагавшего в 1960-х выведение одним запуском модуля с надувной торообразной каучуковой оболочкой [9].

Большие температурные колебания на орбите (от +150 до –150 °С) вынуждают прибегать к специализированным методам формования композитных конструкций. Например, метод вакуумной инфузии (VA-RTM), несмотря на свое название, не предназначен для условий космоса, так как в его основу ложится метод сырой выкладки, при котором сухой армирующий материал пропитывается жидкой эпоксидной, полиэфирной или винилэфирной смолой. При этом для каждой марки смолы существует рабочий диапазон температур, например у эпоксидных смол от +20 до +60 °С. В связи с этим, такой метод формования годится лишь при условиях контроля температурного режима в процессе всей пропитки и отверждения путем изоляции вакуумного пакета теплозащитным покрытием и внедрением в конструкцию системы ответственного подогрева.

Поэтому в разворачивании космических антенн применяется препреговый метод, при котором готовый полуфабрикат, состоящий из уже пропитанного связующим армирующего волокна, подвергается температурному воздействию и начинает пластифицироваться. Подобный процесс формования обладает относительной простотой по сравнению с методом вакуумной инфузии. При этом он дает возможность применению горячего формования под действием естественного солнечного излучения. ВИАМ работает над созданием связующего, чья рабочая температура может достигать $+170^{\circ}\text{C}$. Подобное связующее используется в методе пленочной инфузии (RFI), что является одним из препреговых методов формования, при котором связующее в виде эластичной пленки выкладывается на армирующее волокно и закрывается вакуумным пакетом. Этот метод изменяет направление пропитки связующим с продольного, как в VA-RTM, на поперечный, при котором расплавленная смола преодолевает намного меньшее расстояние для полной пропитки.

Самым ответственным этапом формования композита является отверждение, при котором изменяется реология (вязкость) связующего, его структурный состав и механические свойства всего композита. При термореактивном горячем формовании это часто сопровождается выделением летучих продуктов, по достижению точки начала гелеобразования эти продукты в виде пузырьков замедляют свое движение и возникает опасность повышения пористости конечного композита. Причиной образования пор при горячем формовании в отличие от жидкого (при котором поры являются следствием неравномерного движения потока смолы через гетерогенную микроструктуру волокна [11]) также является влажность, при которой поры состоят из водяного пара и воздуха. Так как выкладка крупногабаритных конструкций и раскрой препрега для них может занимать длительный промежуток времени необходимо обеспечивать особые условия влажности рабочего помещения. По возможности обеспечить преформу, впитывающим слоем вместе с вакуумной системой, отводящей влагу от композита в этот слой.

Заключение. В ходе проведенного исследования был составлен обзор истории развития и современных решений в области разворачиваемых надувных конструкций с отверждаемым армированием. В ходе истории весомый вклад в развитие подобных технологий внесли как зарубежные, так и отечественные исследователи. Основные выводы исследования свидетельствуют о следующем:

- отверждаемое композитное армирование способно решить проблему малой жесткости и подверженности к сдвигу;
- установлено прочностное превосходство тонкостенных оболочковых композитных конструкций над алюминием;
- ведутся исследования по повышению качества такого армирования: поиск новых связующих и препрегов, способных храниться дольше в ожидании даты старта;
- исследуется влияние космического излучения на процесс старения материала;

– определены подходящие для космического пространства технологии формования композитов;

– развивается технология горячего формования пленочной инфузией, для которого в лабораториях ВИАМ разрабатывается связующее с рабочей температурой, подходящей для условий орбиты.

Список источников

- [1] Абрамов И.П., Дудник М.Н., Северщек И.В. *Космические скафандры России*. Москва, Звезда, 2022, 320 с.
- [2] Fuente H., Raboin J.L., Valle G.D. Transhab: NASA's Large-Scale Inflatable Spacecraft. *AIAA Space Inflatables Forum; Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2000. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20100042636/downloads/20100042636.pdf> (accessed 22.06.2025).
- [3] Резник С.В. Актуальные проблемы проектирования, производства и испытания ракетно-космических композитных конструкций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/638.html> (дата обращения 23.06.2025).
- [4] *Echo: The Ancestor of NASA's Communications Satellites*. URL: https://tempo.gsfc.nasa.gov/news/_first_communications_satellite_echo (accessed 24.06.2025).
- [5] *STS-77 Mission Press Kit*. URL: <https://spacepresskit.wordpress.com/wpcontent/uploads/2012/08/sts-77.pdf> (accessed 25.06.2025).
- [6] *Bigelow Expandable Activity Module (BEAM)*. URL: <https://www.nasa.gov/international-space-station/bigelow-expandable-activity-module-beam/> (accessed 26.06.2025).
- [7] *Commercial Space Stations*. URL: <https://www.sierraspace.com/commercial-space-stations/> (accessed 27.06.2025).
- [8] Комар Л.А., Пелевин А.Г., Осоргина И.В. *Надувная антенна для наноспутника*. *Вестник ПФИЦ*, 2019, № 4. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2019.4.2>
- [10] Гилев В.Г., Русаков С.В., Пестренин В.М. Оценка жесткости разворачиваемой внутренним давлением цилиндрической композитной оболочки на начальном этапе полимеризации связующего. *Вестник ПНИПУ. Механика*, 2018, № 1, с. 8.
- [9] *Inflatable technology: using flexible materials to make large structures*. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190001443/downloads/20190001443.pdf> (accessed 30.06.2025).