



## КОНСТРУКЦИИ ПРЕОБРАЗУЕМОГО ОБЪЕМА (Обзор)

Академик **Б. Е. ПАТОН**, академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, **В. С. ВОЛКОВ**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены основные классы конструкций преобразуемого объема, представляющие собой оболочки мягкого и жесткого типов. Изложены основные проблемы, значительно сужающие сферу применения подобных конструкций в современной технике. Предложены технические решения, позволяющие оптимизировать функциональные свойства оболочечных конструкций преобразуемого объема.

*Ключевые слова:* конструкции преобразуемого объема, несущие оболочки, трансформируемые оболочки

Поиск компромисса между необходимостью создания конструкций оболочечного типа требуемых параметров и возможностью их дальнейшего транспортирования к месту эксплуатации связан с решением широкого спектра технических задач, сопровождаемых модернизацией действующих технологий и проведением работ в труднодоступных местах. Главная проблема заключается в сложности реализации в предполагаемом месте использования конструкции длительного и трудоемкого процесса ее изготовления. В то же время развитие техники определяет потребность в оболочках все большего объема и габаритов, диапазон применения которых ограничен либо отсутствием соответствующих средств транспортирования, либо их чрезмерной затратностью. Указанные условия требуют применения конструкций особого класса, способных в широких пределах изменять свои геометрические параметры при практически неизменных механических свойствах материала оболочки — конструкций преобразуемого объема (КПО).

Актуальность работ по созданию КПО обусловлена не только появлением новых нестандартных технических задач, требующих поиска решений соответствующего уровня. Распространенным является случай «оболочки в оболочке», когда необходима модернизация либо замена крупногабаритных емкостей, замкнутых в ограниченном технологическом пространстве (например, отсеке цельносварного корпуса судна).

Известен ряд примеров использования КПО, при которых процесс трансформации применяют для решения самостоятельной технической задачи или получения новых физических свойств объекта — избыточной плавучести, жесткости, отражающей способности и т. п., что может быть выполнено в том случае, когда функциональные и технологические характеристики КПО соответствуют требованиям, предъявляемым к ее прототипу.

Опыт практического применения технических устройств данного класса позволил выделить основные проблемы, устранение которых способно существенно расширить сферу применения КПО в технике. Решение этих проблем сводится к обеспечению многократной воспроизводимости геометрических параметров, герметичности и стабильности прочностных характеристик трансформированной оболочки.

Наибольшее прикладное значение в современной технике имеют несущие оболочки, воспринимающие нагрузку при достаточной жесткости. Их способность к значительным упругим перемещениям можно рассматривать как нежелательное следствие малой толщины и пологости оболочки, связанное с геометрической нелинейностью и потерей устойчивости. Однако именно это свойство является основой для технологии формоизменения оболочек, сочетающих достоинства ограждающих и несущих конструкций.

В большинстве случаев известные КПО условно можно рассматривать как тела типа оболочки, которые распределяются на три основных класса: несущие мягкие; построенные на основе преобразуемого каркаса; жесткие. По типу преобразования КПО делят на конструкции, преобразуемые путем создания избыточного давления во внутреннем объеме, и с помощью механической трансформации несущего каркаса, в том числе с применением материалов с памятью формы. По функциональным признакам КПО можно также условно разделить на герметичные и негерметичные.

В ИЭС им. Е. О. Патона создан отдельный класс КПО, относящихся к твердым оболочкам и способных сочетать характеристики, присущие различным типам трансформируемых оболочек [1]. Технология формоизменения тонкостенных металлических оболочек, большой вклад в создание которой внес В. М. Балицкий, создана на основе способа изометрического изгибания поверхностей и сочетает основные достоинства рассмотренных классов КПО:

возможность непрерывного преобразования конструкции без применения вспомогательных технологических операций;

отсутствие необходимости в поддержании во внутреннем объеме избыточного давления, используемого только в процессе преобразования;

герметичность трансформируемых оболочек, достигаемая путем применения технологии сварки стыковых соединений;

отсутствие необходимости в использовании несущего каркаса;

высокие значения коэффициента трансформации  $K_T$ ;

компактность конструкции до формоизменения.

Разработанные способы формоизменения оболочечных конструкций с сохранением топологически эквивалентной поверхности позволили создать широкий спектр КПО на основе пространственных тел вращения — сферы, эллипсоида и т. д. В основу технологии их изготовления положены способы комбинаторной геометрии; в большинстве случаев практическое решение задачи реализуется замещением поверхности семейством равных многоугольников, последовательно складываемых путем изгиба по линиям сопряжения до взаимного наложения с образованием компактного пакета.

Наиболее перспективными с точки зрения эффективности использования рабочего пространства и удобства при производстве исходных заготовок являются конструкции, форма которых приближена к цилиндрической и конической [2].

В основу конструктивно-технологического решения КПО цилиндрического типа положен принцип преобразования гиперболической складки в оболочку равномерного круглого сечения. Гиперболическая складка — это сложная многогранная поверхность, определяемая двумя видами ребер, которые являются прямолинейными образующими двух соосных однополостных гиперболических. При определенных геометрических соотношениях такая складка отличается подвижностью в осевом направлении и может быть ком-

пактно сложена до соприкосновения ее панелей и торцевых ребер. Благодаря изометричности поверхностей складки и цилиндра сложенная складка может быть преобразована в цилиндрическую оболочку давлением, создаваемым внутри ограниченного этой оболочкой объема. При этом происходит поворот одного из цилиндрических оснований относительно другого, формоизменение складки и изгиб прямолинейных ребер по цилиндрической поверхности. Степень распрямления складки зависит от уровня формирующего давления; при соединении нескольких складок по торцевым кромкам можно получить многосекционную гиперболическую складку, каждая секция которой является самостоятельным преобразуемым элементом.

На рис. 1 показана трансформируемая цилиндрическая оболочка, полученная сопряжением двух гиперболических складок. Различная ориентация ребер по отношению к основаниям цилиндрических заготовок позволяет получить складки правого и левого направления.

В однонаправленных многосекционных системах угол взаимного поворота цилиндрических оснований возрастает пропорционально их количеству. Исключить поворот, крайне нежелательный в большинстве случаев потенциального использования цилиндрических КПО (например, шлюзовых камер, исключаящих деформацию и круговое смещение стыковочных узлов), можно при равном количестве правых и левых складок.

К основным недостаткам цилиндрических КПО следует отнести трудоемкую технологию формирования гиперболических складок, требующую создания сложного специального оборудования для каждого типоразмера конечного изделия. Опытным путем установлено, что оптимальный результат при формировании складок можно получить лишь в определенном диапазоне соот-

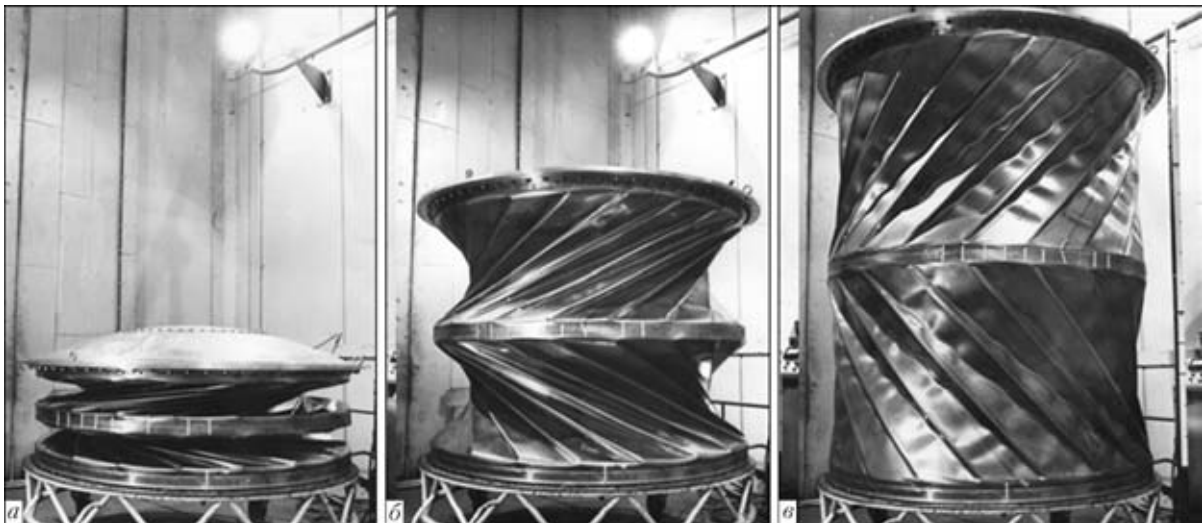


Рис. 1. Трансформируемая цилиндрическая двухсекционная оболочка (материал — сталь 12Х18Н10Т, толщина 1 мм и диаметр 2000 мм) на промежуточных стадиях трансформации (а, б) и в развернутом состоянии (в) ( $K_T = 10$ )



ношений  $0,3 \leq H/D \leq 0,6$ , где  $H$  — высота трансформируемой части оболочки;  $D$  — диаметр оболочки-заготовки.

В большинстве случаев предпочтительной является хорошо отработанная технология изготовления КПО путем формирования гофрированных дисков из тонкостенных конических заготовок, позволяющая создавать конструкции широкого диапазона типоразмеров и параметров.

Как и в рассмотренном случае конструкций цилиндрической формы, технология изготовления КПО конического типа основана на способе изометрического преобразования поверхности, которая предусматривает возможность изгиба оболочки без растяжения или сжатия материала [3]. Технология заключается в формоизменении заготовки (замкнутой конической усеченной оболочки) в диск с множественными кольцевыми гофрами. Исходная высота конуса уменьшается до значения, соответствующего глубине канавки формирующей матрицы.

Широко используемые в приборостроении металлические диски с кольцевыми гофрами имеют преимущественно небольшие размеры и гофры малой глубины. Такие мембраны обычно изготавливают способом штамповки, что неприемлемо для изделий с глубокими кольцевыми гофрами при относительно небольшом шаге.

Поскольку деформированию подвергается одновременно вся поверхность заготовки, требуется использование технологического процесса с мощным прессовым оборудованием; штамповка мембран со значительной глубиной гофров не может быть осуществлена в однопроходном процессе, необходимо применение набора штампов с плавно возрастающей глубиной ручьев.

Кроме того, материал заготовки претерпевает значительные (до 50 %) пластические деформации, вызывающие появление наклепа и повышающие его твердость. Для восстановления пластичности заготовки требуются межоперационный отжиг, очистка поверхности от окалины и т. п.

С учетом перечисленных факторов наиболее приемлемой технологией формоизменения конической заготовки можно считать ротационное выдавливание формирующим роликом на формематрице, воспроизводящей расчетную геометрию конечного гофрированного диска. Технология позволяет формировать диски диаметром от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров. После герметизации дисков по большому и малому основанию исходного конуса можно осуществить их обратное преобразование в коническую оболочку путем создания во внутреннем объеме избыточного давления. При этом на поверхности оболочки сохраняются кольцевые гофры, вызванные местным растяжением матери-

ала при формовке и повышающие радиальную жесткость конструкции.

Необходимое количество отдельных гофрированных дисков можно объединить с помощью сварки по большим и малым основаниям в одну структуру, которая после преобразования приобретает форму многоконусной оболочки требуемых размеров и конфигурации. Перспективным является использование многоконусных оболочек в космической отрасли в качестве несущих штанг, шлюзовых отсеков и переходных тоннелей, дополнительных функциональных объемов либо контейнеров для отработанных материалов [1].

На рис. 2 представлены многоконусная оболочка периодического профиля, состоящая из трансформируемых гофрированных дисков (1), и общий вид после раскрытия герметичной КПО (2), которая может найти применение при создании крупногабаритных космических конструкций [2]. Диаметр оболочек может достигать 4000 мм, общий объем 40 м<sup>3</sup> и более, что позволяет использовать подобные конструкции в качестве накопительных емкостей и хранилища для сыпучих и жидких веществ [3]. На рис. 3 изображена крупногабаритная КПО, используемая в качестве бака-аккумулятора в системе автономного водоснабжения.

В мировой практике первыми из КПО нашли промышленное применение трансформируемые несущие мягкие оболочки, которые использовали в строительстве, при создании летательных и космических аппаратов. Их совершенствованию способствовало появление новых материалов, сочетающих высокую прочность со стойкостью против воздействия агрессивных факторов окружающей среды и малым удельным весом.

В строительной отрасли нашли применение пневматические конструкции на основе воздухо-несомых покрытий, функции каркаса в которых выполняют несущие пневмобаллоны. Наибольшей функциональностью характеризуются мягкие оболочки с двойной трансформацией (рис. 4): первый шаг преобразования объема предназначен для создания базовых элементов несущей конструкции, второй — технологического пространства необходимой конфигурации на их основе.

Развитие в последние десятилетия полимерных и композитных материалов способствовало появлению нового подкласса инженерных сооружений, получивших название воздухоопорных конструкций. Фиксация несущей оболочки в рабочем положении осуществляется с помощью поддержания в эксплуатационном объеме незначительного избыточного давления, не превышающего уровня нормальных барометрических колебаний. Мягкая оболочка из армированной светонепроницаемой ПВХ ткани герметично крепится на лен-

точном фундаменте, периметр которого может составлять сотни метров (рис. 5).

Вариант воздухоопорной конструкции обтекателя антенны радиолокационной станции [6], выполненный из армирующего материала типа вектран (vectran), представлен на рис. 6. Оболочка диаметром 36 м, высотой 39 м и массой около 8 т способна противостоять ветровым нагрузкам, соответствующим скорости ветра более 200 км/ч без снижения эксплуатационных характеристик радара.

Использование несущих мягких оболочек стало одним из первых удачных решений по снижению массы искусственных спутников Земли. В частности, в США реализованы проекты запуска на околоземную орбиту трех спутников научного назначения и серии коммерческих спутников, представляющих собой различные типы мягких трансформируемых оболочек. В US Naval Research Laboratory планируется запуск сферического исследовательского спутника, построенного на основе трансформируемого каркаса [7]. Из-за особенностей эксплуатации рассматриваемых конструкций в условиях открытого космоса большое значение имеет создание материалов оболочки, характеризующихся заданными свойствами.



Рис. 2. КПО периодического профиля (материал — титан ВТ1-0, толщина 0,15 мм), состоящая из 11 базовых конических оболочек [2]: 1 — конструкция в компактном сложенном состоянии; 2 — конструкция после раскрытия

На рис. 7 представлен общий вид спутника со сферической оболочкой из синтетического полиэфирного волокна — майлара (mylar) — с металлизированным покрытием.

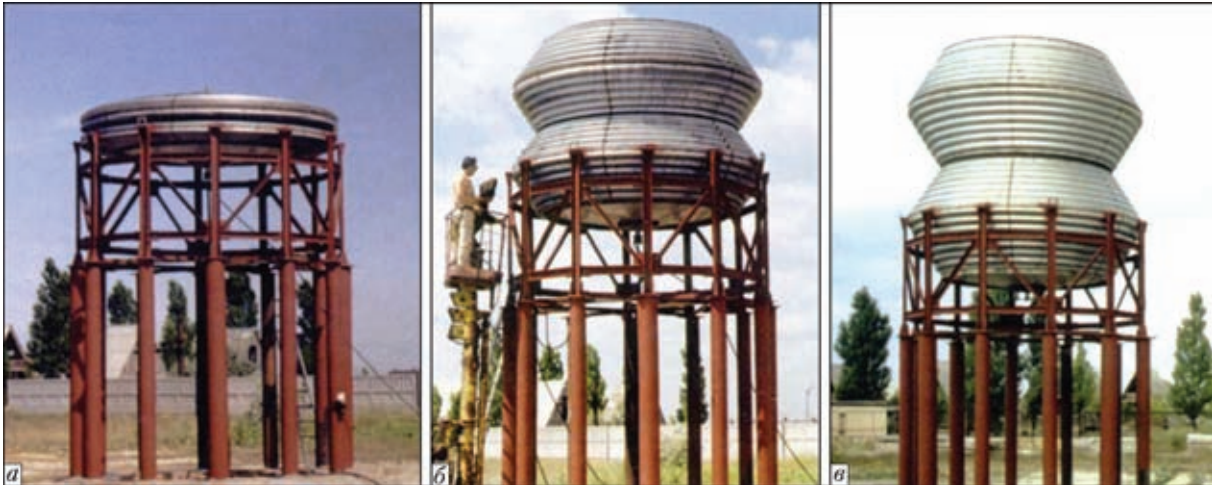


Рис. 3. Крупногабаритная КПО из четырех конических оболочек (материал — сталь 08X18H10T, толщина 2,5 мм, диаметр 3800 мм, высота 4500 мм, объем 40 м<sup>3</sup>) [3]: а — начальная; б — промежуточная; в — заключительная стадия преобразования

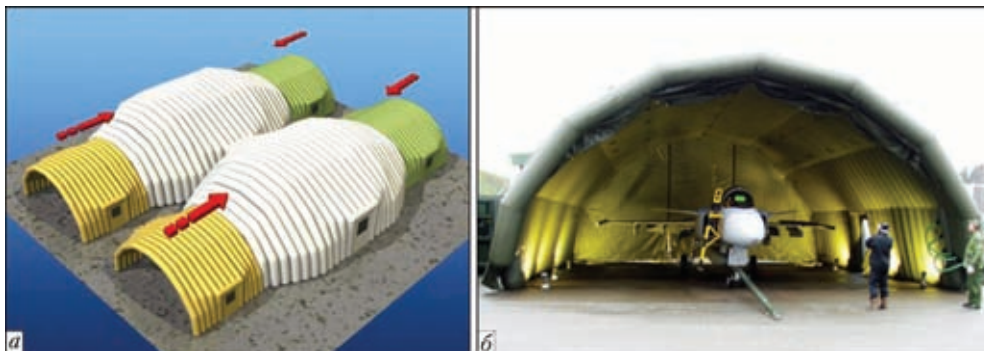


Рис. 4. Воздухонесомые конструкции ангарного типа на основе пневмобаллонов, предназначенные для использования в качестве мобильных жилых и складских помещений (а, стрелками указаны направления обратной трансформации) и для укрытия авиатехники в ВВС Швеции (б) [4]



Рис. 5. Варианты конфигурации воздухоопорных конструкций компании «Вингида», Финляндия—Латвия [5]

В 2009 г. исследовательский центр НАСА «Лэнгли» (NASA LaRC) провел удачный эксперимент по запуску и возвращению с орбиты спускаемого аппарата, построенного компанией «ILC Dover» на основе упругой преобразуемой оболочки. Конструктивно аппарат представлял собой пневматическую конструкцию с воздуходнесомым покрытием и каркасом из несущих пневмобаллонов (рис. 8).

На высоте 211 км уложенная в цилиндрический пакет диаметром 0,4 м оболочка из кевлара раскрылась избыточным давлением до диаметра 3 м и возвратилась в плотные слои атмосферы. В результате эксперимента продемонстрирована способность конструкций подобного класса противостоять давлениям и температурам, возникающим при прохождении атмосферных слоев на гиперзвуковых скоростях, сохраняя при этом структурную целостность и аэродинамическую стабильность оболочки [9].

Результатом совместных работ «ILC Dover» и НАСА по проектированию обитаемых долговременных лунных баз стало создание прототипа тороидальной лунной обитаемой станции (Toroidal Lunar Habitat), представляющей собой преобразуемую воздухоопорную конструкцию из вектрана, армированного полосами кевлара, и жесткого цилиндрического основания для размещения энергетического оборудования (рис. 9).



Рис. 6. Воздухоопорная конструкция антенного обтекателя на испытательной платформе ILC Dover в Мексиканском заливе [6]

В рамках программы НАСА «Созвездие» компанией «ILC Dover» разработаны жилые модули обитаемых лунных станций X-Hab Lunar Habitat, представляющие собой гибридные конструкции на основе двух металлических полусферических оболочек, соединяемых между собой мягким цилиндрическим туннельным переходом переменной длины с коэффициентом трансформации, т. е. отношением определяющих параметров в исходном и преобразованном состояниях,  $K_T = 10...12$  [6]. На рис. 10 представлены стадии преобразования конструкции в лаборатории исследовательского центра НАСА «Лэнгли».

По всей видимости, широкому применению несущих мягких оболочек в условиях космоса может препятствовать возрастающая засоренность околоземного пространства. Эксплуатацию описанных конструкций проводили на низких орбитах, практически свободных от остатков отработанных космических аппаратов, а их столкновения с твердыми частицами внеземного происхождения могли носить лишь случайный характер.

Стационарные космические станции для защиты от столкновения с мелкими телами снабжены системой слежения и корректировки орбиты; тем не менее ремонт и замена элементов наружной



Рис. 7. Спутник наблюдения PAGEOS с массой оболочки 56 кг и диаметром 31 м [8]

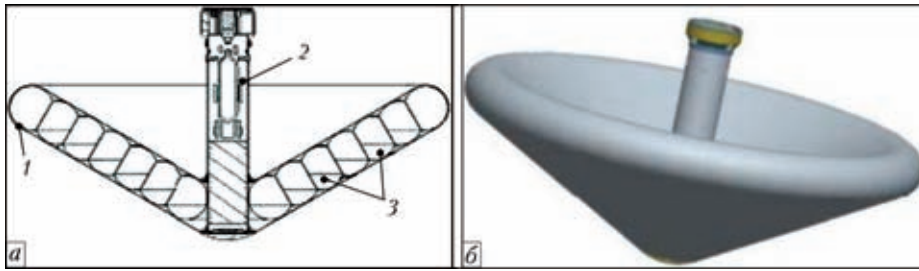


Рис. 8. Схема преобразуемого спускаемого аппарата (*а*: 1 — защитная оболочка из кевлара; 2 — жесткая центральная часть конструкции с системой наддува; 3 — тороидальные несущие пневмобаллоны) и общий вид аппарата (*б*) [9]

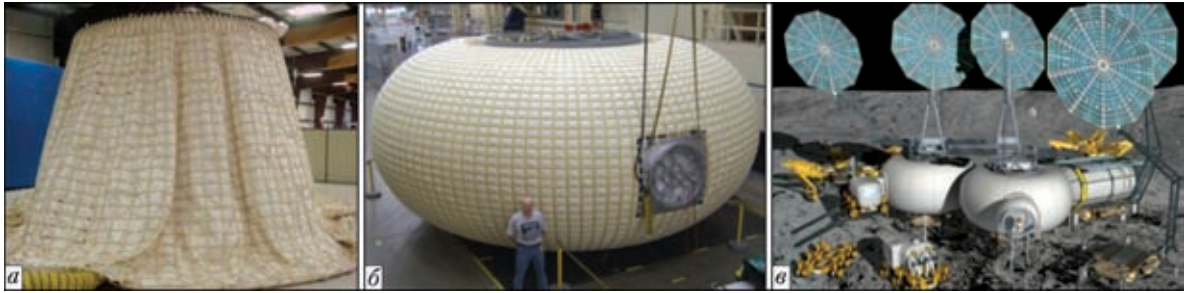


Рис. 9. Тороидальная лунная обитаемая станция: *а* — сложенное состояние; *б* — состояние полного раскрытия; *в* — проект обитаемой лунной базы НАСА, построенной на основе Toroidal Lunar Habitat [6]



Рис. 10. Стадии преобразования модуля X-Hab [6]

обшивки входит в число обязательных регламентных мероприятий.

Очевидное преимущество несущих мягких оболочек заключается в способности к неограниченному количеству прямых и обратных преобразований, компактности в сложенном состоянии и малом удельном весе конструкции. Коэффициент трансформации  $K_T$  может достигать 25...30. Главные их недостатки — это отсутствие достаточной жесткости, необходимость постоянного поддержания во внутреннем объеме избыточного давления, низкая устойчивость материала оболочки против колебаний температур, ультрафиолетового излучения, ветровых нагрузок и т. п.

При построении мягких оболочек на основе несущего преобразуемого каркаса преследуются две основные цели: сделать процесс преобразования одношаговым и создать каркас, конфигурация которого несущественно влияет на коэффициент трансформации конструкции. В складывающейся конструкции (рис. 11) точки шарнирного закрепления 2 и 3 несущих стержневых элементов каркаса имеют скользящие связи; возникающие на них усилия последовательно передаются соседним узлам по на-

правлению 4, в результате трансформация каркаса проходит в направлении уменьшения его горизонтального сечения.

Поиск средств по обеспечению геометрической стабильности каркаса способствовал появлению конструкций с переменной жесткостью оболочки, в которых применение несущей основы сочетается с преобразованием с помощью избыточного давления.

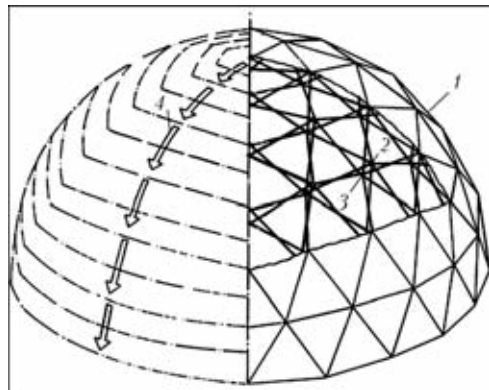


Рис. 11. Схема складывающейся конструкции [10]: 1 — сферическая конструкция; 2, 3 — точки шарнирного закрепления; 4 — направление складывания

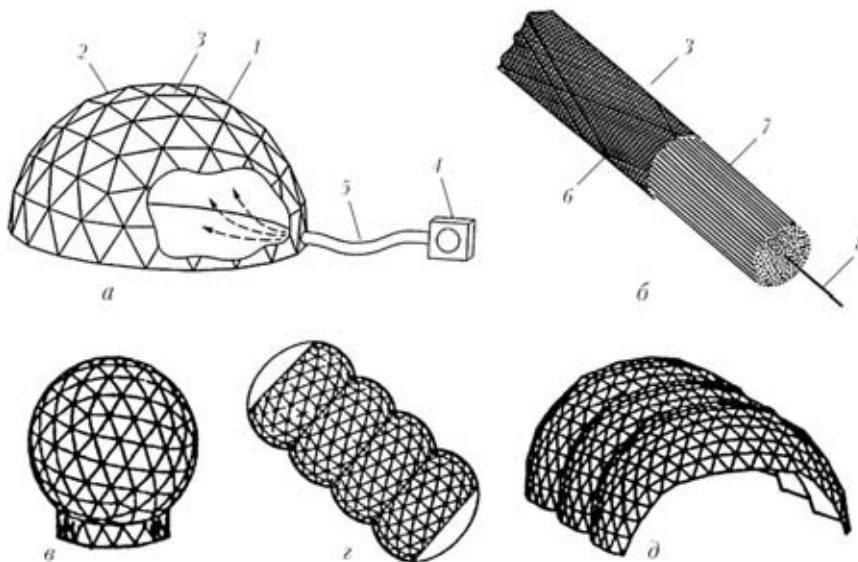


Рис. 12. Схема надувной конструкции с переменной жесткостью оболочки [11]: *a* — вариант использования технологии для формирования герметичной полусферической оболочки; *б* — элемент с переменной жесткостью; *в–д* — возможные конфигурации конструкций, созданные по данной технологии: *1* — трансформируемая конструкция; *2* — внешнее покрытие оболочки, выполненное из майлара или каптона; *3* — элементы с переменной жесткостью; *4* — компрессор; *5* — нагнетательный канал; *6* — внешнее покрытие элемента *3*; *7* — жгут из термопластического волокна; *8* — нагревательный элемент

На рис. 12 представлены трансформируемые оболочки, которые фиксируются в раскрытом положении с помощью элементов на основе термопластического волокна. Нагрев элементов и их последующее охлаждение приводит к жесткой фиксации размягченных волокон в положении, определяемом конфигурацией отдельных участков каркаса.

Главным недостатком элементов с переменной жесткостью является невозможность многократной трансформации конструкций на их основе — характерного свойства мягких оболочек. Альтернативным решением стало появление геометрически стабильных несущих конструкций со сложной пространственной конфигурацией, приближенной к сферической оболочке.

Распространение получили различные варианты так называемой сферы Хобермана, при разработке несущего каркаса которой использовали технологии компьютерного моделирования.

На рис. 13 дано схематическое изображение спутника PERCS, транспортируемого на орбиту в сложенном компактном состоянии [12]. Проект PERCS можно считать удачным вариантом применения технологии преобразования оболочки,

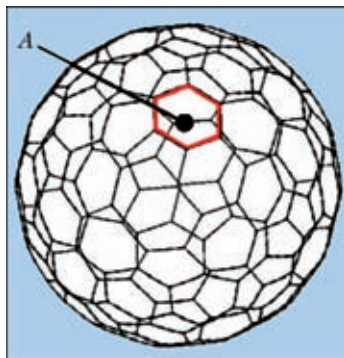


Рис. 13. Схема спутника PERCS — трансформируемой сферы, образованной подвижно соединенными между собой панелями *A* [13] (диаметр в исходном состоянии 1,25 м, в трансформированном 10,3 м)

герметичность которой не является обязательной; объект относится к классу пассивных спутников и не оснащается какой-либо аппаратурой.

В последние годы предприняты попытки испытаний вне земной атмосферы обитаемых трансформируемых конструкций оболочечного типа, однако ни один из заявленных проектов до сих пор не реализован в полном объеме. В 2006–2007 гг. компанией «Bigelow Aerospace» (США) выведены на орбиту высотой 500 км два первых прототипа обитаемых космических станций, представляющих собой мягкие герметичные многослойные оболочки толщиной 150 мм на каркасной основе (рис. 14). После трансформации путем создания избыточного давления во внутреннем объеме диаметр модуля увеличивается до 2,54 м при неизменной длине [14]. При значительном удельном весе жесткого металлического каркаса и низком коэффициенте трансформации конструкции модулей лишены главных преимуществ гибких оболочек, но имеют решающие преимущества при выводе на орбиту ракетами-носителями с относительно малым сечением транспортного отсека.

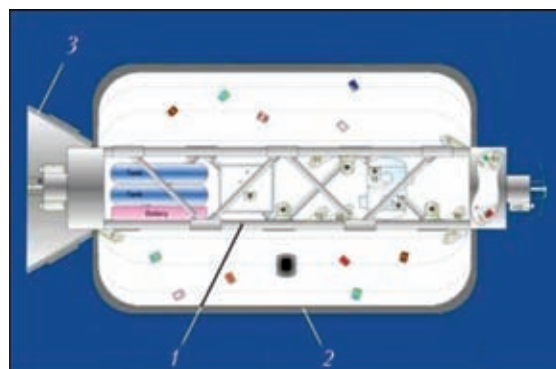


Рис. 14. Космический модуль Genesis I/II [14] (масса 1363 кг, длина в транспортном состоянии 4,4 м; диаметр до трансформации 1,6, после трансформации 2,54 м): *1* — жесткий металлический каркас, на котором расположены системы жизнеобеспечения модуля; *2* — трансформируемая оболочка; *3* — стыковочный узел



Рис. 15. Модель двухстенчатой преобразуемой конической оболочки (материал — титан ВТ1-0, толщина 0,15 мм): *a* — компактное состояние; *b* — развернутое состояние; *в* — осевые сечения несущих элементов (шпангоутов) *I* и *II*; *C*, *D* — несущий и вспомогательный шпангоуты; *F* — днище оболочки; *G* — преобразуемые конические оболочки

Современные материалы с новыми свойствами позволяют создавать космические КПО, коэффициент объемной трансформации  $K_T$  которых может достигать 10. Однако задача сочетаемости этих параметров с достаточной прочностью и герметичностью оболочек остается нерешенной. В частности, конструкции вакуумплотных оболочек модулей Genesis способны обеспечить коэффициенты трансформации  $K_T \approx 1,6$ , которые в земных условиях приемлемы лишь при преобразовании объема некоторых лабораторных и измерительных устройств либо перспективных конструкций, в которых решаются параллельные задачи оптимизации массогабаритных и прочностных характеристик.

Преобразование объема отдельных элементов приборов широко применяют в лабораторной и измерительной технике, в узлах систем трубопроводов и специальной запорной арматуре, в частности в трубчатых компенсаторах — тороидальных оболочках с круговой или близкой к окружности формой меридиана, способных испытывать незначительные упругие деформации. Большое распространение получили сильфоны — тонкостенные трубы с кольцевыми гофрами, в большинстве случаев изготавливаемые из сплавов цветных металлов и легированных сталей.

Коэффициент трансформации  $K_T$  в сильфонных конструкциях определяется особенностями профиля оболочки, способной сжиматься лишь в пределах промежутков между гофрами. Сильфоны герметичны, могут подвергаться многократному формоизменению под действием изменяющегося давления, но имеют особенность — потерю осевой устойчивости при внутреннем давлении, не отличаясь достаточной жесткостью на изгиб.

На основании сравнительного анализа существующих классов КПО можно сделать вывод о том, что сочетание технологически приемлемых прочностных характеристик оболочки со значительными коэффициентами трансформации при одновременной герметичности возможно лишь в жестких несущих оболочках, среди которых наиболее оптимальными благодаря простоте технологии формо-

изменения являются конические и многоконусные преобразуемые конструкции. Тем не менее, функциональные качества данного класса преобразуемых конструкций ограничены отсутствием отлаженного алгоритма многократного формоизменения, а отсутствие инвариантности конструктивных исполнений требует создания универсальной расчетной методики определения базовых геометрических параметров. Одним из основных подходов к оптимизации конструкции жестких трансформируемых оболочек, позволяющим существенно расширить сферу их применения, является создание двухслойной конструкции, в которой благодаря дублированию наружной стенки можно предотвратить последствия возможной разгерметизации.

Опытным путем установлено, что процесс, реализуемый в основном за счет деформации изгиба материала, позволяет производить также совместное формоизменение нескольких заготовок равной геометрии. Дальнейшая сборка и сварка базовых элементов в КПО осуществляется на кольцевых силовых элементах (шпангоутах), выполняющих функции кондуктора при совмещении кромок базовых элементов, подкладки в ходе сварочного процесса и силового элемента, несущего технологические и эксплуатационные нагрузки (рис. 15, *б*). Плотность прилегания кромок двухслойных оболочек обеспечивается специально разработанным приспособлением, позволяющим стягивать базовые элементы вдоль оси КПО.

После герметизации полученных дисков по большому и малому основанию исходного конуса осуществляется их обратное преобразование в коническую оболочку путем создания во внутреннем объеме избыточного давления. При окончательной трансформации на поверхности оболочки сохраняются характерные кольцевые гофры, вызванные местным растяжением материала в вершинах технологических ребер при формообразовании и повышающие радиальную жесткость полученной конструкции.

Цель эксперимента с опытной двухслойной оболочкой заключалась в определении влияния





дублирующей стенки на характер трансформации и степень увеличения избыточного давления, необходимого для преобразования конструкции. На рис. 15 представлена модель двухстенчатой оболочечной конструкции в компактном и развернутом состоянии. Оболочка оснащалась манометром с ценой деления  $0,01 \cdot 10^4$  Па. При плавном увеличении давления раскрытие двухслойного гофрированного диска проходило ступенями, начиная с гофров большего диаметра и заканчивая меньшими, при этом деформация внутренней оболочки вызывала возрастание избыточного давления в межстеночном пространстве и, как следствие — раскрытие наружной оболочки.

По достижении максимального значения давления для текущего диаметра гофр скачкообразно разворачивался, при этом давление резко падало из-за увеличения внутреннего объема оболочки; процесс повторялся вплоть до полной трансформации КПО к расчетным размерам. Необходимое для полной трансформации двухслойной оболочки давление составляло  $P_2 = 22,1 \cdot 10^4$  Па, для однослойной оболочки с аналогичными парамет-

рами  $P_1 = (9,32 \dots 9,51) 10^4$  Па. Таким образом, для дублирующей стенки требуется более чем двукратное повышение технологического давления трансформации.

В процессе преобразования усеченного конуса в гофрированный диск и последующей обратной трансформации обеспечиваются четкие геометрические зависимости между углом конусности, длиной образующей конуса и параметрами гофрированного диска, что позволяет с высокой точностью моделировать технологические операции и узлы КПО с двойной оболочкой. Полученные в ходе эксперимента результаты позволяют сделать заключение о возможности создания длинномерных двухстенчатых конструкций, подобных существующим многоконусным КПО периодического профиля.

Перспективные задачи использования многоконусных КПО в качестве выдвижных систем и корпусных конструкций орбитальных космических модулей связаны с необходимостью их последующей утилизации, требующей отработки механизма обратной трансформации с сохранением исходной геометрии. Способность жестких оболочек преобразуемого объема к многократной воспроизводимости стабильных геометрических параметров согласуется с основами метода регулярного изометрического преобразования. Однако реальная металлическая оболочка после первого повторного цикла преобразования приобретает волнообразные деформации в межгофровых промежутках, свидетельствующих о местной потере устойчивости (рис. 16).

В ходе проведенного эксперимента во внутренней полости модели с помощью вакуумного насоса создали разрежение примерно  $P = -9,32 \cdot 10^4$  Па, что соответствует обратному значению давления, необходимого для раскрытия исходного гофрированного диска. В пределах полного цикла трансформации продолжительностью 33 с зафиксировано полное восстановление исходной формы двухстенчатой оболочки с локальными деформациями в окрестностях вершин ребер. При последующих циклах отмечено нарастание местных деформаций и объединение зон их локализации, приводящих к общей потере устойчивости конструкции.

Одним из возможных вариантов изменения технологии преобразования для реализации многократного формоизменения оболочки может быть уменьшение радиуса закругления вершин ребер матрицы, увеличивающее жесткость остаточных кольцевых гофров. При этом зоны максимальных упругопластических деформаций локализируются в окрестностях вершин гофров, а синусоидальный профиль конической образующей приближается к виду кусочно-ломаной кривой, соответствующей исходной математической мо-

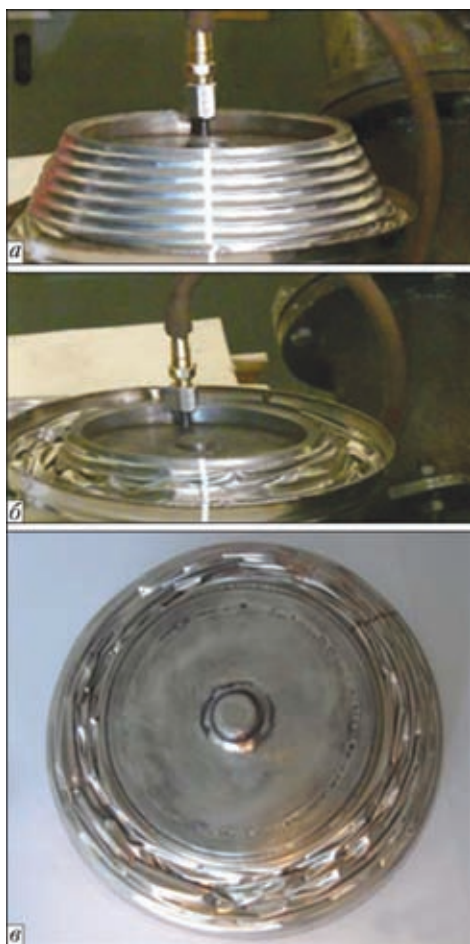


Рис. 16. Обратная трансформация конической оболочки с синусоидальным профилем образующей (материал — титан ВТ1-0, толщина 0,15 мм): а — промежуточная стадия преобразования; б — полная обратная трансформация оболочки; в — внешний вид оболочки после полной обратной трансформации

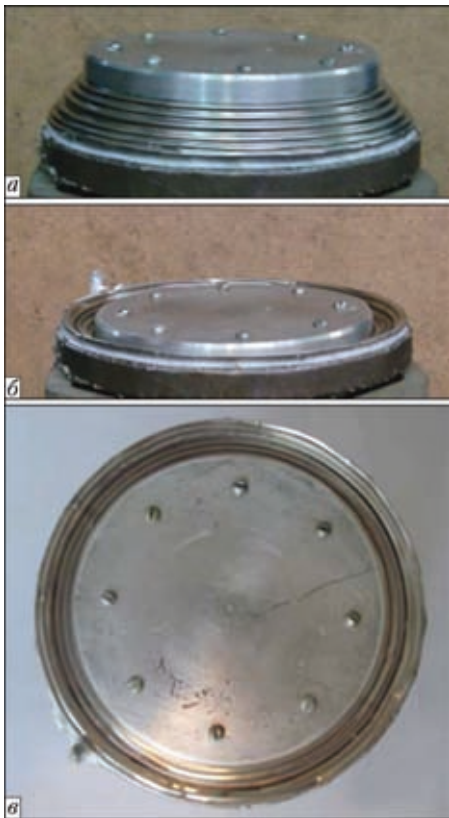


Рис. 17. Обратная трансформация конической оболочки с кусочно-ломаным профилем образующей (материал — титан ВТ1-0, толщина 0,15 мм): а — промежуточная стадия преобразования; б — полная обратная трансформация оболочки; в — внешний вид оболочки после полной обратной трансформации

дели зеркального отображения усеченной конической поверхности.

На рис. 17, а, б показаны стадии обратной трансформации модели конической КПО с кусочно-ломаным профилем образующей и конфигурацией, соответствующей оболочке, представленной на рис. 16. После полного восстановления исходной формы появления деформаций не отмечалось, при трех последующих циклах также не обнаружено зон локальной потери устойчивости конструкции. На рис. 16, в и 17, в показан внешний вид конических КПО с синусоидальным и кусочно-ломаным профилями образующей после полного обратного преобразования. На рис. 16, в

различно резкое искажение поверхности оболочки в виде множественных изломов межгофровых промежутков, оболочка на рис. 17, в полностью сохранила исходные геометрические параметры.

Проведенные эксперименты на модельных образцах свидетельствуют о возможности повторной трансформации КПО с конструктивными элементами конического типа и создания двухстенчатых КПО.

Анализ различных классов КПО показал, что они находят все более широкое использование в строительной отрасли и аэрокосмической технике. Созданные в ИЭС им. Е. О. Патона КПО на основе жестких несущих оболочек являются перспективными для применения в различных условиях монтажа и эксплуатации, включая экстремальные.

1. *Космос: технологии, материаловедение, конструкции*: Сб. науч. тр. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2000. — 528 с.
2. *Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф.* Сварка и родственные технологии в космосе. — Киев: Наук. думка, 1998. — 183 с.
3. *Расчет и особенности технологии изготовления крупногабаритной сварной конструкции преобразуемого объема* / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, В. Н. Самилев и др. // Автомат. сварка. — 2006. — № 7. — С. 3–12.
4. *Надувные конструкции* // [www.lindstrandusa.com](http://www.lindstrandusa.com).
5. *Воздухоопорные конструкции* // [www.vingida.ru](http://www.vingida.ru).
6. *Воздухоопорные сооружения для военных целей* // [www.ilcdoover.com](http://www.ilcdoover.com).
7. *The design and applications of a versatile HF radar calibration target in low-earth orbit* / A. Bernhardt, C. L. Siefring, J. F. Thomason et al. // *Radio Sci.* — 2008. — № 8. — P. 11–21.
8. *Описание проекта PAGEOS* // [www.nssdc.gsfc.nasa.gov](http://www.nssdc.gsfc.nasa.gov).
9. *Inflatable Re-entry vehicle experiment (IRVE) design overview* / S. J. Hughes, R. A. Dillman, B. R. Starr et al. // 18th AIAA aerodynamic decelerator systems technology conference» and seminar (Munich, Germany, May 23–26, 2010). — Munich, 2010. — P. 52–58.
10. *Pat. 4290244 USA, MKU E04 B1/32.* Collapsible self-supporting structures a panels and nud therefor / Th. R. Zeigler. — Publ. 22.09.1981.
11. *Pat. 5579609 USA, MKU B64699/00.* Rigidizable inflatable structure / B. T. Sallee. — Publ. 12.03.1996.
12. *Раскрывающийся спутник PERCS* // [www.hoberman.com](http://www.hoberman.com).
13. *Pat. 6834465 USA, MKU E04 B1/344.* Folding covering panels for expanding structures / C. Hoberman. — Publ. 28.12.2004.
14. *Модуль Genesis II* // [www.bigelow aerospace.com](http://www.bigelow aerospace.com).

The paper deals with the main classes of transformable structures, which are shells of soft and rigid type. The main problems are outlined, which greatly reduce the range of application of such structures in modern engineering. Technical solutions, allowing optimization of functional properties of transformable shell structures, are suggested.

Поступила в редакцию 20.07.2011