

На правах рукописи

Фан Тхе Шон

**АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ
МНОГОСТЕНОЧНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ОБОЛОЧЕК
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность 05.07.03 – Прочность и
тепловые режимы летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель:

Смердов Андрей Анатольевич

доктор технических наук, профессор кафедры
«Космические аппараты и ракеты-носители»
МГТУ имени Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты:

Дудченко Александр Александрович

доктор технических наук,
профессор кафедры 603 ФГБОУ ВО «Московский
авиационный институт (национальный
исследовательский университет)»

Степанов Николай Викторович

кандидат технических наук,
начальник лаборатории 42,
АО «ОНПП «Технология» имени А.Г. Ромашина»
г. Обнинск

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
университет науки и технологий имени академика
М.Ф. Решетнева»

Защита состоится «05» октября 2017 года в 14 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д212.141.22 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный переулок, дом 10, факультет Специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, ауд. 407м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «___» 2017г.

Отзывы, заверенные гербовой печатью, просьба направлять по адресу:
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5 стр. 1, МГТУ им Н.Э. Баумана, ученому
секретарю диссертационного совета Д 212.141.22.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Луценко А.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В ракетно-космической технике актуальны задачи проектирования элементов цилиндрических оболочечных конструкций: отсеков и обтекателей ракет-носителей (РН) и разгонных блоков (РБ), корпусов космических аппаратов, тубусов космических телескопов и др. Как правило, основной целью оптимального проектирования композитных конструкций является обеспечение сочетания минимальной массы и способности сопротивляться действующим нагрузкам в необходимых направлениях. Достижение этой цели осуществляется выбором оптимальных параметров, определяющих размеры элементов конструкции и структуру материала этих элементов (количество слоев композита, углы армирования и толщины этих слоев). Для проектирования композитных конструкций характерно усложнение как формулировок, так и путей решения задач оптимального проектирования.

На сегодняшний день в зависимости от требований к проектируемым композитным оболочечным конструкциям могут быть использованы различные конструктивные схемы: сетчатые, трехслойные с легким (сотовым) заполнителем, стрингерно-шпангоутные и другие. Каждая из них имеет свои преимущества и недостатки. Конструктивная схема многостеночной композитной оболочки, хотя и была принципиально известна ранее, в настоящее время переживает новое рождение. Это связано с использованием перспективных технологий инфузии и инжекции. С точки зрения технологии изготовления многостеночные оболочки могут быть отнесены к интегральным панельным конструкциям, однако по особенностям своей несущей способности стоят ближе к трехслойным несущим оболочкам. Основными преимуществами данного типа конструкций являются технологичность, высокая массовая эффективность, высокие характеристики материала, реализуемые в конструкции, а также возможность достижения различных сочетаний свойств композитных структур в обшивках и стенах. Имеющиеся сегодня публикации в основном посвящены технологическим приемам изготовления таких конструкций, тогда как подробный анализ их свойств и особенностей применения отсутствует.

В связи с этим тема диссертационной работы, требующая решения важной научно-технической задачи, связанной с разработкой методики проектных расчетов многостеночных композитных силовых оболочек отсеков ракет-носителей, является актуальной.

Целью работы является разработка расчетных методик и проведение анализа несущей способности и оптимизации многостеночных композитных силовых оболочек отсеков ракет-носителей и разгонных блоков.

Исходя из этого, в диссертации рассмотрены следующие **задачи**:

1. Сформулирована задача оптимального проектирования многостеночных несущих композитных оболочек по критериям минимизации массы и максимизации несущей способности.

2. Разработаны вычислительные методики, расчетные алгоритмы и проведено численное исследование несущей способности и возможностей оптимального проектирования многостеночных оболочек отсеков РН и РБ.
3. Проведена сравнительная оптимизация многостеночных несущих оболочек и трехслойных оболочек с сотовым заполнителем, дана оценка рациональных областей применения каждого типа конструкций.
4. Проведены экспериментальные исследования характера деформирования и разрушения фрагментов многостеночных оболочек при воздействии температуры и силовой нагрузки и сформулированы выводы о возможности их применения в конкретных конструкциях РН.

Объектом исследования являются несущие композитные многостеночные оболочки, применяемые в конструкциях отсеков РН и РБ.

Предметом исследования являются расчетное исследование несущей способности оболочек с учетом различных механизмов исчерпания прочности и потери устойчивости, численный анализ влияния проектных параметров на несущую способность конструкции, и также экспериментальные исследования характера деформирования и оценка работоспособности многостеночных конструкций в эксплуатационных условиях.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Разработаны методика, алгоритмы и программы для анализа несущей способности и оптимизации многостеночных оболочек. Предложенная методика продемонстрирована на конкретных примерах ракетно-космических конструкций. Впервые получены и исследованы оптимальные структуры типовых многостеночных несущих конструкций РН и РБ.
2. Проведена оценка областей рационального применения многостеночных и трехслойных несущих композитных оболочек и даны рекомендации по повышению массовой эффективности несущих оболочек РКТ.
3. Проведено экспериментальное исследование характера деформирования и разрушения и возможности сохранения несущей способности многостеночной оболочки в условиях воздействия одностороннего нагрева и сжимающей нагрузки, имитирующих старт и полет РН.

Степень достоверности полученных научных положений, результатов и выводов, приведенных в диссертации, обеспечивается строгим математическим обоснованием предлагаемых методов и подходов, а также сопоставлением с соответствующими экспериментальными данными и известными результатами других авторов.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования ее результатов для проведения расчетов и оптимизации несущих композитных оболочек отсеков ракет и разгонных блоков, а также многостеночных оболочек различного назначения.

На защиту выносятся:

1. Методика проектных расчетов многостеночных композитных оболочек с учетом различных механизмов исчерпания прочности и потери устойчивости.

2. Результаты анализа влияния проектных параметров на несущую способность многостеночных оболочек. Границы предельных возможностей при одновременной максимизации несущей способности и минимизации массы несущих оболочек.
3. Результаты сравнительной оптимизации многостеночных и трехслойных оболочек с сотовым заполнителем.
4. Результаты экспериментального исследования характера деформирования и разрушения фрагментов многостеночных оболочек в условиях воздействия одностороннего нагрева и сжимающих нагрузок, имитирующих старт и полет РН «Протон».
5. Рекомендации по возможности применения многостеночной структуры в конструкциях отсеков ракет-носителей и разгонных блоков.

Внедрение результатов. Результаты работы внедрены в учебном процессе кафедры СМ1 «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана и могут быть рекомендованы для использования при оптимальном проектировании несущих оболочек летательных и космических аппаратов.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации. Разработка методики, создание программно-алгоритмического обеспечения расчётов, проведение проектных расчётов многостеночных оболочек, их анализ и обобщение.

Апробация основных результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XXXIII международной заочной научно-практической конференции «Научная дискуссия: вопросы технических наук». (Москва, 2015г); Международной научно-практической конференции «Современные технологии и технический прогресс». (Воронеж, 2015г); VII Всероссийской научно-практической конференции «Научная дискуссия: гуманитарные, естественные науки и технический прогресс», (Ростов-На-Дону, 2015г); Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении». (Томск, 2015г); IV Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». (Москва, 2015г); XLIX Научных Чтениях памяти К.Э. Циолковского. (Калуга, 2015г); Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Федосеева В.И., (Москва, 2016г).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ. Основное содержание диссертационного исследования отражено в 3 научных статьях, опубликованных в рецензируемых ВАК Минобрнауки РФ журналах, и в 7 докладах и их аннотациях, опубликованных в сборниках трудов научных конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 110 страниц, 28 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 104 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, определяется объект и предмет исследования, формулируются цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, приводятся описание ее структуры и содержания.

В **первой главе** представлено современное состояние проблем оптимального проектирования несущих оболочечных композитных конструкций. Глава содержит описание существующих формулировок и постановок задачи оптимального проектирования таких конструкций, и также подходов и методов решения этих задач. Приведен обзор публикаций, посвященных проблемам оптимального проектирования композитных конструкций, прежде всего, применительно к конструкциям ракетно-космической техники. Отмечены работы Н.А. Алфутова, Н.В. Баничука, В.А. Бунакова, В.В. Васильева, П.А. Зиновьева, Ю.В. Немировского, Б.Г. Попова, А.Ф. Разина, А.А. Смердова и многих зарубежных авторов. На основе обзора литературы сформулирована общая постановка задачи оптимального проектирования композитных многостеночных оболочек.

Отмечено, что многостеночные оболочки из углепластика сегодня исследованы слабо. Имеющиеся публикации в основном посвящены технологическим приемам изготовления таких конструкций или методике их испытаний, тогда как подробный анализ свойств и особенностей применения многостеночных оболочек либо не публикует, либо отсутствует.

Отмечена важность исследования проблем оптимального проектирования таких конструкций, в том числе, разработки методики проектных расчетов и экспериментальных исследований при воздействии термосиловых нагрузок. Кроме того, еще одно направление исследований должно быть связано с определением областей оптимального применения многостеночных оболочек в сравнении с известными конструктивными схемами, прежде всего, трехслойной.

Вторая глава посвящена задаче оптимального проектирования многостеночных несущих оболочек по критериям минимизации массы конструкции и максимизации несущей способности при заданных действующих нагрузках. В главе основное внимание уделено описанию методики проектных расчетов многостеночных оболочек с учетом различных механизмов исчерпания прочности и потери общей и местной устойчивости.

Объект проектирования – цилиндрическая многостеночная оболочка, изображена на Рис. 1, имеет одинаковые симметрично расположенные обшивки. Оболочка нагружена осевой сжимающей/растягивающей силой N , к которой может также быть добавлено внешнее/внутреннее давление p . Многослойный пакет обшивок и стенок включает в себя набор n различных монослоев, каждый из которых отличается от остальных либо свойствами материала, либо направлением их ориентации. С целью повышения жесткости и устойчивости в конструкцию могут быть добавлены угловые вставки, представляющие собой односторонние стержни.

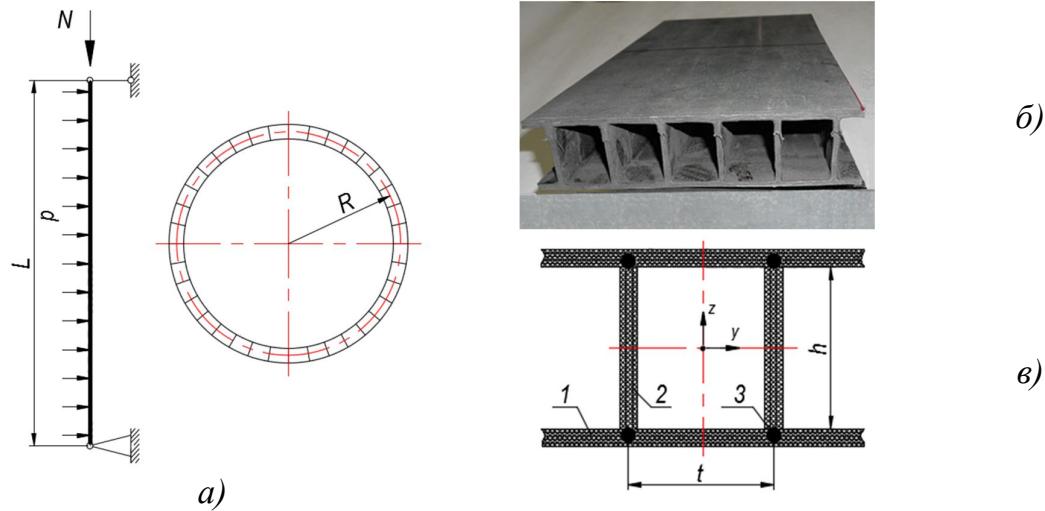


Рис. 1. Многостеночная композитная оболочка (а), ее панель (б) и ее основные элементы (в): 1 – обшивка, 2 – стенка, 3 – вставка.

Постановки задачи оптимального проектирования многостеночных несущих композитных оболочек заключается в исследовании предельных возможностей по обеспечению минимальной массы и максимальной несущей способности при заданных действующих нагрузках. Последний критерий понимается как максимизация наименьшей из предельных нагрузок, определяющих прочностное разрушение элементов композитной конструкции и различные виды общей и местной потери устойчивости.

$$\max P_{\text{пред}}(X) = \max_{X \in D_X} \min_i \{P_{\text{пред}}^{(i)}\}$$

где: X – вектор варьируемых параметров исследуемого объекта, $P_{\text{пред}}$ – предельная величина параметра нагрузки при пропорциональном нагружении (например, осевой силой и боковым давлением), i – номер механизма исчерпания несущей способности. Если нагрузки заданы в нескольких расчетных случаях, в вектор $\{P_{\text{пред}}^{(i)}\}$ включаются все возможные критерии исчерпания несущей способности во всех расчетных случаях.

Многостеночные конструкции как объект проектирования обладают большими возможностями. К числу варьируемых параметров при их оптимизации могут относиться: размеры элементарной ячейки, структурные параметры обшивок и стенок, наличие/отсутствие вставок в составе конструкции и их параметры.

В главе описаны разработанные алгоритмы расчета различных механизмов исчерпания несущей способности многостеночных оболочек. Обсуждаются особенности расчета на прочность элементов оболочек по первому разрушению, расчетные алгоритмы общей устойчивости двумя способами – по гипотезам Кирхгофа-Лява и ломаной линии с учетом сдвига, а также алгоритмы расчета местной устойчивости элементов оболочки как многослойных ортотропных удлиненных пластин, сжатых вдоль длинных сторон.

Приводятся расчетные формулы для проектных оценок несущей способности многостеночных оболочек. На основе данных формул разработаны расчетные программы, с помощью которых проведен анализ несущей способности и оптимизация таких оболочек.

В третьей главе проведен анализ влияния проектных параметров несущую способность оболочек на примере несущей оболочки корпуса разгонного блока «ДМ-SL», разработанного РКК «Энергия» для участия в международном проекте «Морской старт». Оболочка представляет собой цилиндрическую оболочку диаметром 3,7 м и длиной 4,0 м, нагруженную осевой сжимающей силой 4,05 МН. Рассматриваются два материала обшивок и стенок – низкомодульный углепластик ЛУ-П/ЭНФБ, до сих пор применяемый в отечественных ракетно-космических конструкциях, и современный высокомодульный углепластик М60J/Ероху.

Сравнительный анализ двух используемых методов расчета устойчивости многостеночных оболочек иллюстрирует Рис. 2. На нем изображены зависимости общей устойчивости от размера элементарной ячейки. По оси абсцисс отложены значения относительной высоты стенки h/δ_c , а по оси ординат – значения запаса общей устойчивости.

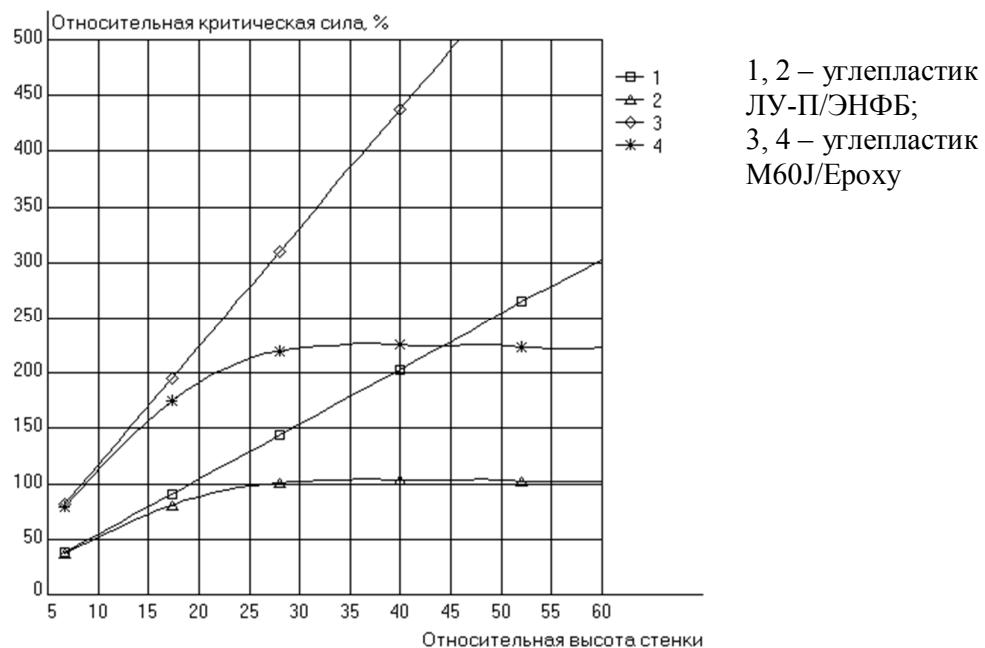


Рис. 2. Результаты расчета устойчивости многостеночной оболочки по гипотезам Кирхгофа-Лява (1, 3) и ломаной линии (2, 4)

Расчеты показывают, что при относительной высоте стенки более 20 использование гипотез Кирхгофа-Лява приводит к большим погрешностям, и следует использовать гипотезы ломаной линии. Это можно объяснить тем, что при больших значениях высоты стенки сдвиговые деформации в плоскости стенки оказывают значительное влияние. Еще один вывод из проведенного исследования заключается в том, что увеличение высоты стенки приводит к повышению общей устойчивости лишь до известного предела, после которого

устойчивость практически остается неизменной. Этот максимальный уровень запаса устойчивости сильно зависит от модуля упругости используемого материала, причем высокомодульные материалы способны обеспечить примерно в 2,5 раза большую устойчивость, чем низкомодульные.

На Рис. 3 приводятся результаты исследования зависимости несущей способности от характеристик армирования обшивок и стенок. По оси абсцисс отложены значения угла армирования φ при одинаковой структуре обшивок и стенок $[\pm\varphi^0/0^0/\pm\varphi^0]$. Область несущей способности выделена затенением. Видно, что при изменении структуры армирования несущая способность может лимитироваться любым из рассмотренных механизмов. При этом оптимальные углы армирования перекрестно армированных слоев также могут изменяться в широких пределах.

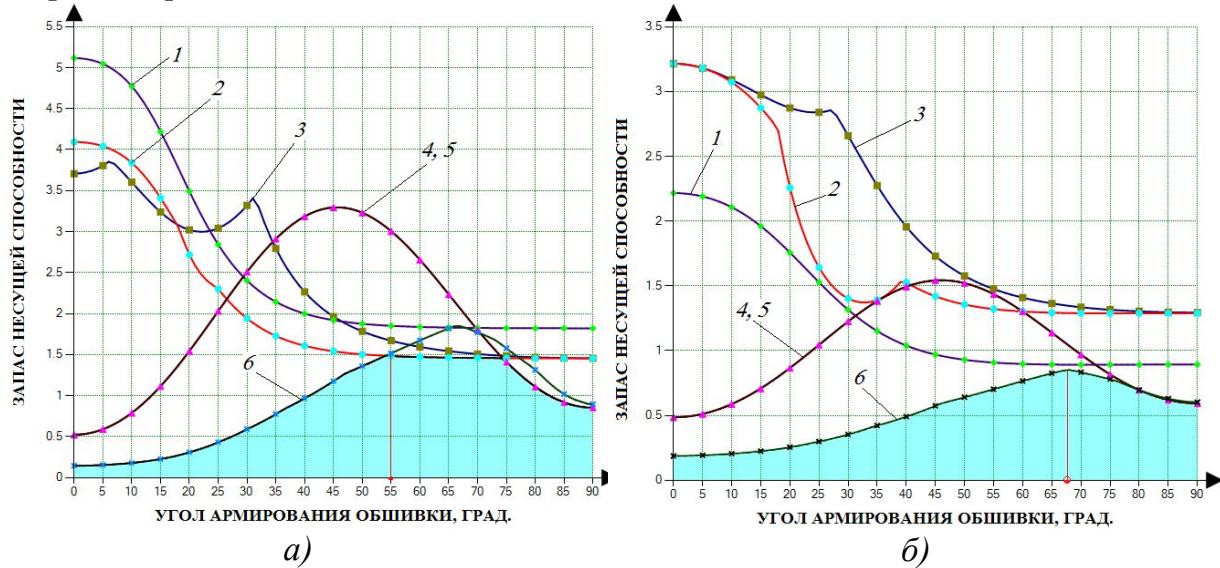
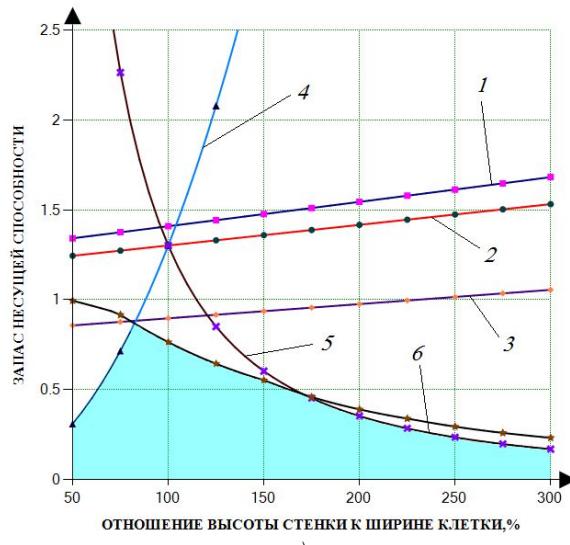


Рис. 3. Зависимость несущей способности многостеночной оболочки из высокомодульного (а) и низкомодульного (б) углепластика от структуры армирования обшивок и стенок.

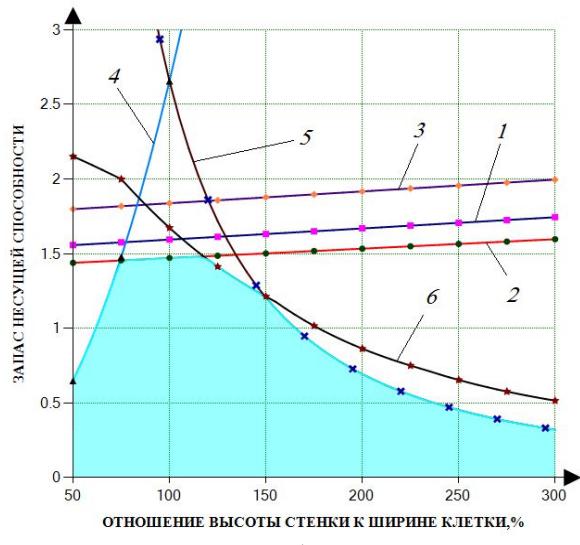
1 – запас прочности вставки, 2 – запас прочности стенки, 3 – запас прочности обшивок, 4 и 5 – запас местной устойчивости обшивки и стенки, 6 – запас общей устойчивости

Следует отметить, что использование угловых вставок способно повысить жесткость и устойчивость конструкции, однако может привести к снижению ее прочности. Это связано с тем, что жесткие вставки берут на себя нагрузку и разрушаются первыми.

Рис. 4 показывает результаты анализа несущей способности многостеночных оболочек с различными обшивками и стенками. При этом для сохранения неизменной массы конструкции полагалось, что толщина стенки изменяется совместно с величиной t так, что отношение $\delta_c h/t = const$, $h = 25$ мм. На этом рисунке структура обшивок и стенок из углепластиков одинакова, различаются только их толщины. Кривые показывают различные механизмы исчерпания несущей способности многостеночной оболочки. Как и ранее, область несущей способности выделена затенением.



a)

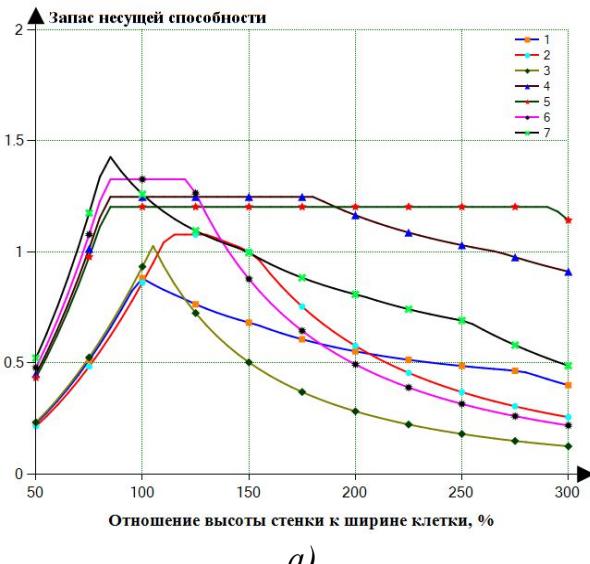


b)

Рис. 4. Несущая способность многостеночной оболочки при различных параметрах обшивок и стенок

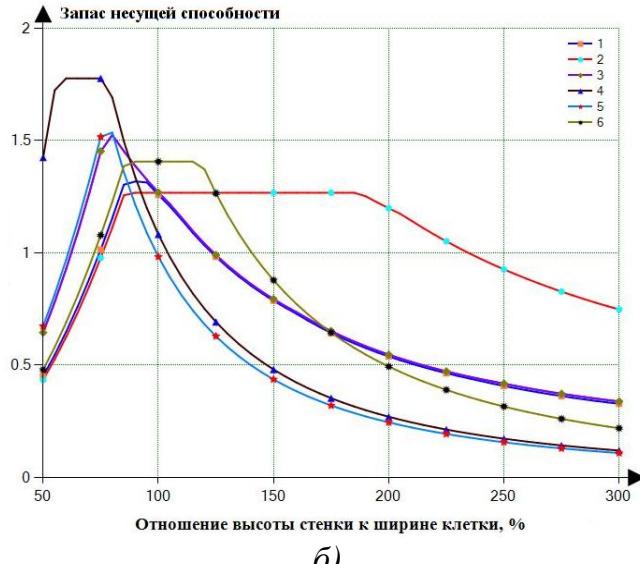
а) – из углепластика ЛУ-П/ЭНФБ, б) – из углепластика М60J/Ероху

1 – запас прочности обшивки, 2 – запас прочности стенки, 3 – запас прочности вставки, 4 – запас местной устойчивости обшивки, 5 – запас местной устойчивости стенки, 6 – запас общей устойчивости



a)

1÷3 – из углепластика ЛУ-П/ЭНФБ
4÷7 – из углепластика М60J/Ероху.
1 и 4 – $[\pm 45^\circ]$, 2 и 5 – $[\pm 80^\circ]$,
3 и 6 – $[90^\circ \pm 45^\circ / 90^\circ]$, 7 – $[\pm 30^\circ]$



b)

1÷6 – из углепластика М60J/Ероху.
1 – $[\pm 45^\circ]$, 2 – $[\pm 80^\circ]$, 3 – $[\pm 45^\circ / 0^\circ / \pm 45^\circ]$,
4 – $[\pm 80^\circ / 0^\circ / \pm 80^\circ]$, 5 – $[90^\circ / 0^\circ / \pm 45^\circ]$,
6 – $[90^\circ / \pm 80^\circ / 90^\circ]$

Рис. 5. Запас несущей способности при различных структурах армирования стенки при осевом сжатии (а) и при совместном нагружении осевой силы и внешнего давления (б)

Кривые, показанные на Рис. 5, построены при различных структурах армирования стенки, а структура обшивки во всех случаях оставалась

$[\pm 60^\circ/0^\circ/\pm 60^\circ]$. Здесь каждая линия показывает несущую способность текущего варианта конструкции. Все графики несущей способности представляют собой ломаные линии, составленные из отрезков, каждый из которых соответствует какому-либо механизму разрушения. Так несущая способность многостеночной оболочки при малых значениях h/t определяется местной потерей устойчивости обшивки, а при значительных – местной потерей устойчивости стенки.

Проведено исследование различных постановок задачи оптимизации конструкции. Оптимизация проводилась для нескольких вариантов варьирования параметров многостеночной оболочки. В качестве целевой функции во всех случаях выступал минимум массы конструкции, ограничения сводились к обеспечению заданной несущей способности. При варьировании толщин обшивок и стенок учитывалось, что они должны содержать целое число монослоев. Оптимизация проводилась методом глобального перебора по сетке.

Анализ различных постановок оптимизационной задачи показал следующее:

- При сохранении квадратной клетки и одинаковых структур обшивок и стенок возможности оптимизации ограничены.
- При сохранении квадратной клетки и варьировании структур обшивок на классе $[\pm \phi/0^\circ/\pm \phi]$ и стенок $[\pm \psi]$ для низкомодульного материала масса конструкции уменьшается, причем это снижение гораздо больше для высокомодульного материала.
- При раздельном варьировании h и t , обшивок $[\pm \phi/0^\circ/\pm \phi]$ и стенок $[\pm \psi]$ для низкомодульного материала весовой выигрыш увеличивается, хотя и незначительно.

В четвертой главе изложены результаты исследования сравнительной эффективности многостеночных и трехслойных несущих оболочек отсеков ракет-носителей и разгонных блоков. Такой анализ проводится для типичного реального отсека разгонного блока, а также для целого класса отсеков, отличающихся условиями нагружения и требованиями к массе несущих оболочек.

Для несущей оболочки разгонного блока «ДМ-SL» получены оптимальные структуры, свойства которых приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Результаты оптимизации несущей оболочки среднего переходника РБ «ДМ-SL»

Проектные параметры и свойства оптимальной конструкции (1)	Многостеночная оболочка		Трехслойная оболочка	
	Углепластик на основе ленты (2)	Углепластик на основе ткани (3)	Углепластик на основе ленты (4)	Углепластик на основе ткани (5)
Толщина продольного слоя в обшивке δ_0 , мм	0,1	0	0,1	0
Толщина спирального слоя в обшивке δ_ϕ , мм	0,4	0,8	0,2	0,8
Угол армирования спиральных слоев в обшивке ϕ , град	± 50	± 26	± 54	± 22

Таблица 1. (Продолжение)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Толщина спирального слоя в стенке $\delta_c, \text{мм}$	0,4	0,8	—	—
Высота стенки или толщина заполнителя $h, \text{мм}$	10	12	14	11
Ширина клетки $t, \text{мм}$	15	25,2	—	—
Толщина спирального слоя в стенке $\delta_c, \text{мм}$	0,4	0,8	—	—
Высота стенки или толщина заполнителя $h, \text{мм}$	10	12	14	11
Масса оболочки $G, \text{кг}$	102,3	138,2	111,6	159,0
Запас прочности обшивок $P_{\text{пр}}^{(o)}$	1,27	2,38	1,17	2,17
Запас прочности стенок $P_{\text{пр}}^{(c)}$	2,95	2,38	—	—
Запас общей устойчивости $P_{\text{уст}}$	1,01	1,02	1,03	1,00
Запас местной устойчивости $P_{\text{уст.м}}^{(o)}$	1,28	1,07	1,61	1,48
Запас местной устойчивости $P_{\text{уст.м}}^{(c)}$	18,2	4,73	1,31	2,08

На Рис. 6 показаны зависимости массы оптимальной конструкции многостеночной оболочки от заданной формы клетки. При построении этих графиков задавалось соотношение t/h и проводилась оптимизация прочих параметров. Видно, что зависимости имеют сложных характер; в них имеются разрывы, возникающие при появлении или исчезновении новых монослоев в обшивке и стенке. Оптимальное соотношение высоты стенки и ширины клетки зависит от многих факторов, включая степень анизотропии исходного материала.

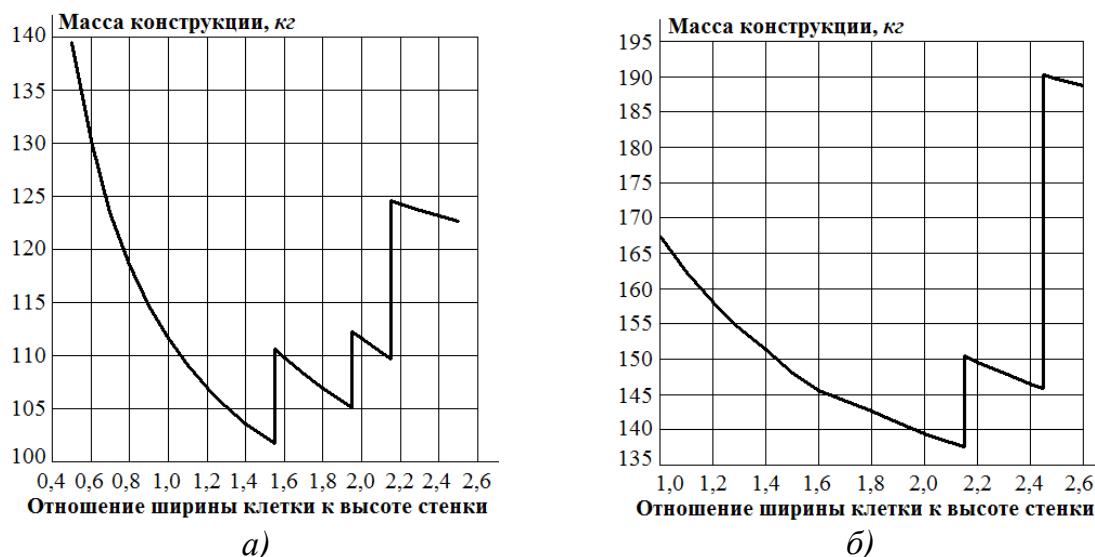


Рис. 6. Зависимость массы оптимальной многостеночной оболочки из углепластика на основе однонаправленной ленты (а) и углепластика на основе ткани (б) от отношения ширины клетки к высоте стенки

Для проведения анализа предельных возможностей была выбрана оболочка средних габаритов, соответствующая отсеку ракеты или разгонного блока среднего класса. Для этой оболочки проводилось исследование предельных возможностей в координатах «минимум массы – максимум несущей способности». Несущая способность определялась при нагружении осевой сжимающей силой.

На Рис. 7 показаны границы предельных возможностей для многостеночных и трехслойных оболочек из различных углепластиков. Основное объяснение сложного характера приведенных кривых заключается в дискретном характере увеличения толщины обшивок и стенок, которое возможно только путем прибавления целого числа слоев.

Сравнительный анализ эффективности оптимальных оболочек позволяет сформулировать следующие выводы.

- Для обеих рассмотренных конструктивных схем рост несущей способности с ослаблением требований по массе происходит крайне неравномерно. Это связано с дискретным характером изменения толщин многослойных материалов; особенно сильно выражен этот эффект для углепластика на основе ткани.
- В целом многостеночная структура оказывается эффективнее трехслойной в рассмотренном диапазоне нагрузок и масс оболочки, хотя в некоторых случаях их эффективность близка. Это связано с большей адаптивностью многостеночной схемы за счет большего числа варьируемых параметров и отсутствием дополнительной массы клея.
- Преимущество многостеночной схемы над трехслойной возрастает с увеличением нагрузок и ослаблением требований по массе.

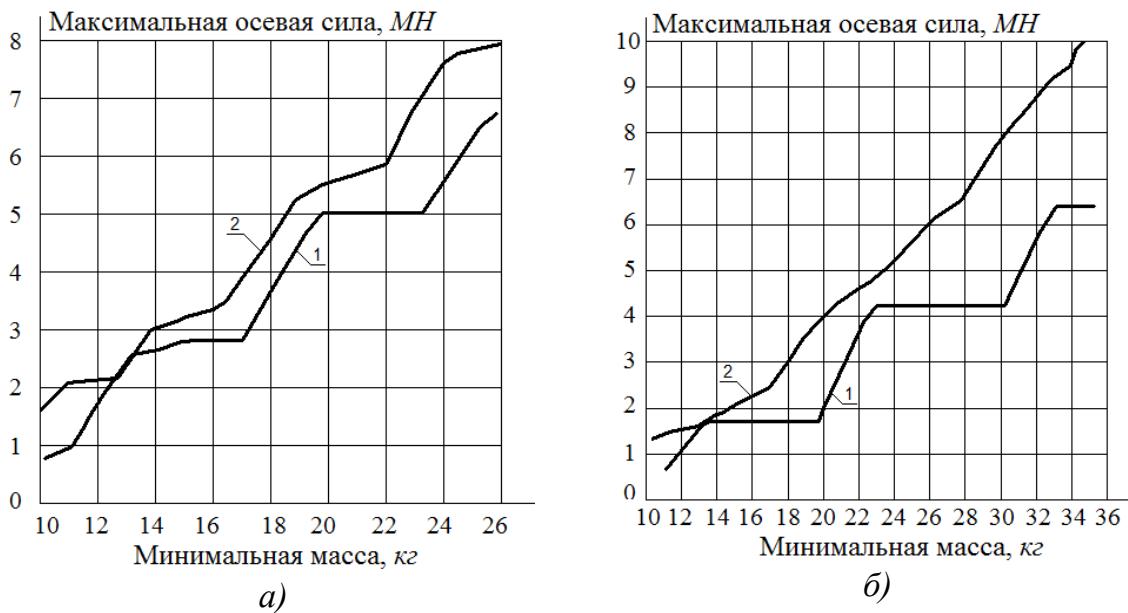


Рис. 7. Границы предельных возможностей в координатах «минимум массы – максимум несущей способности» для трехслойных (1) и многостеночных (2) оболочек: (а) – из высокомодульного углепластика на основе однонаправленной ленты; б) – из углепластика на основе ткани

В пятой главе представлены методика и результаты экспериментального исследования сегментов реальных многостеночных оболочек при термосиловом воздействии. Задачей таких испытаний является имитация штатной эксплуатации реальной конструкции с целью установить, сохранит ли несущую способность образец, если общая сжимающая нагрузка, действующая на него, и температура на нагреваемой обшивке образца изменяются в соответствии с заданными зависимостями.

Целью поставленной задачи является экспериментальное исследование характера деформирования и разрушения фрагментов несущей многостеночной оболочки, и оценка их работоспособности в условиях температурного и силового воздействий, соответствующих штатной эксплуатации РН.

Для достижения этой цели проведены два вида испытаний: исследования характера деформирования и разрушения многостеночных образцов в условиях одноосного сжатия при полном прогреве до заданной температуры и подтверждение работоспособности многостеночных образцов в условиях воздействия одностороннего нагрева и сжимающей нагрузки, имитирующих старт и полет ракеты-носителя «Протон».

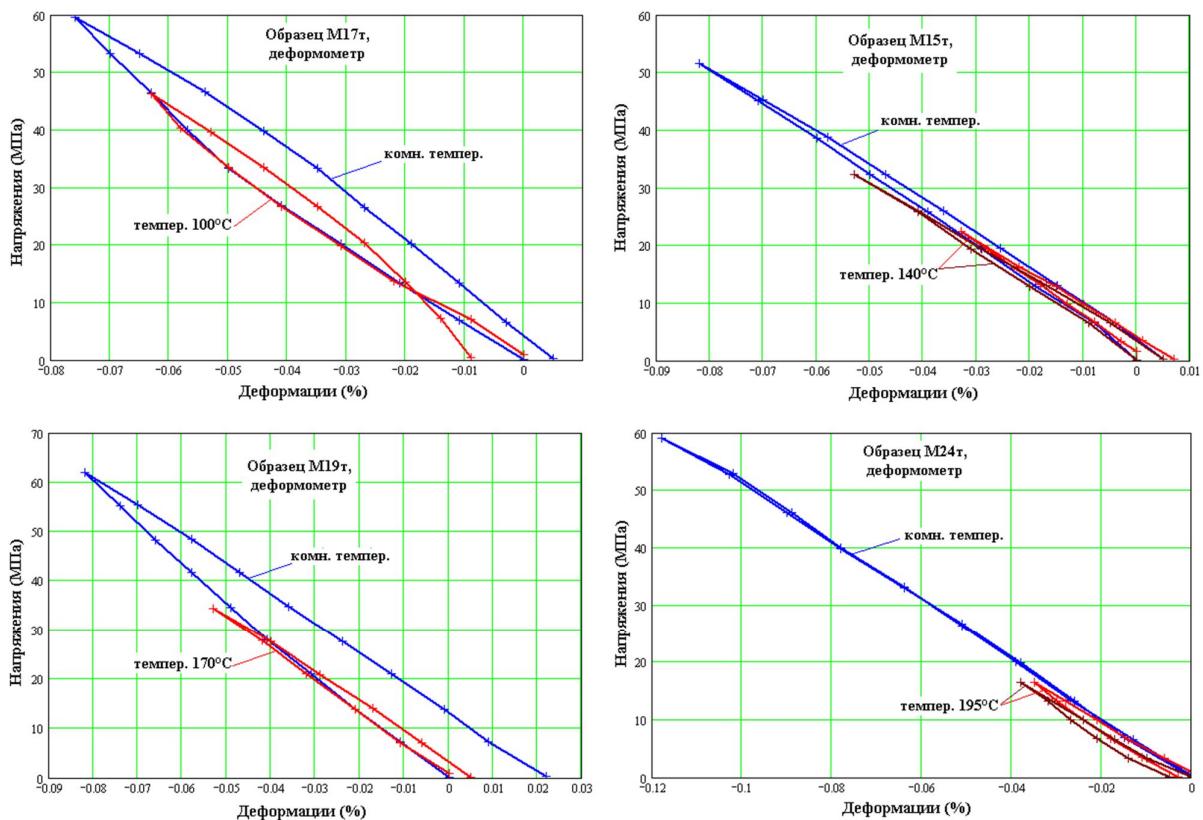


Рис. 8. Зависимость «средние напряжения – продольные деформации» по показаниям деформометра при комнатной и повышенной температуре

На Рис. 8 представлены типичные для каждой температуры зависимости «нагрузка – продольные деформации» по зарегистрированным деформометром данным. Для сравнения приведены показания деформометра для исследуемого образца при последнем перед нагревом нагружении и при повышенной

температуре. Результаты измерения показывают, что средний модуль упругости на начальном участке нагружения для исследуемых образцов практически не изменяется при повышении температуры в исследованном диапазоне от комнатной до 190°C. Прочность же при повышении температуры сильно уменьшается.

На Рис. 9 показана зависимость относительной прочности от температуры испытания. На Рис. 10 приведены отношения значений модуля упругости при повышенной температуре к модулю упругости при комнатной температуре по показаниям деформометра. Эти данные подтверждают отсутствие влияния температуры на модуль упругости на начальном участке деформирования.

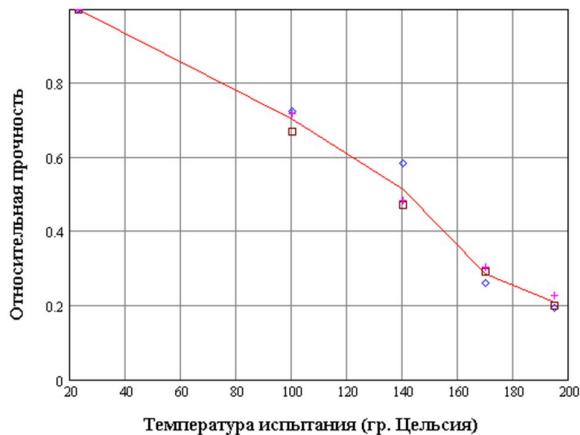


Рис. 9. Зависимость относительной прочности от температуры

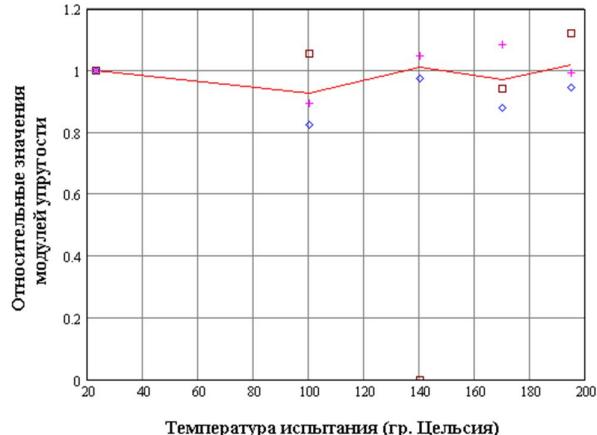


Рис. 10. Зависимость относительных значений модулей упругости от температуры

(точки – экспериментальные значения, линия – средние значения)



При 140°C

При 170°C

При 195°C

Рис. 11. Типичный вид образцов после испытания на разрушение при повышенной температуре

На Рис. 11 показан типичный вид образцов, разрушенных при повышенной температуре. Можно заметить, что вид зон разрушения при повышении температуры существенно изменяется: чем выше температура, тем менее ярко

выражена зона разрушения. Это связано, по-видимому, с тем, что при уменьшении разрушающей нагрузки уменьшается энергия, накапливаемая образцом к моменту разрушения и реализуемая в расслоении и трещинообразовании. Это значит, что с увеличением температуры материал становится менее хрупким.

Испытания по оценке работоспособности фрагментов многостеночных оболочек в условиях, близких к условиям реальной эксплуатации, проведены на трех образцах. На Рис. 12 приведены экспериментальные и заданные зависимости температур и нагрузки от времени для одного из испытаний. Все три образца выдержали испытания без разрушения. Таким образом, доказано, что исследованная структура может быть использована для изготовления несущих конструкций РН тяжелого класса (типа «Протон»).

Приведенные результаты экспериментальных исследований позволяют сформулировать следующие выводы.

- Проведены испытания модельных образцов. Установлено, что характеристики упругости многостеночных образцов мало зависят от температуры в исследованном диапазоне от комнатной до 195°C, но характеристики прочности снижаются с увеличением температуры весьма значительно, что характерно для углепластиковых конструкций при нагружении на сжатие.
- По результатам испытаний зафиксировано, что все образцы выдержали имитацию пуска РН без разрушения. Таким образом, подтверждена несущая способность многостеночной структуры и принципиальная пригодность ее для использования в крупногабаритных ракетно-космических конструкциях обтекателей и отсеков ракет-носителей и разгонных блоков.

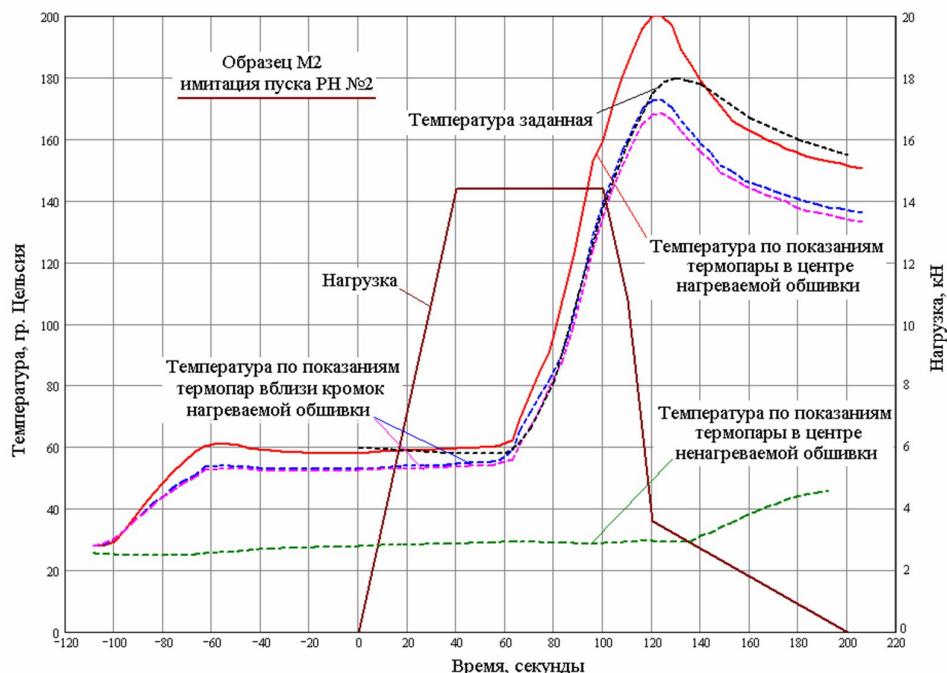


Рис. 12. Результаты имитации пуска РН для одного из испытаний

В **заключении** сформулированы основные полученные в работе результаты.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработана методика расчета и оптимизации многостеночных композитных силовых оболочек отсеков ракет-носителей и разгонных блоков, содержащая простые инженерные формулы, пригодные для многократного перебора вариантов, который проводится при оптимизации конструкции. Методика включает расчет прочности многослойных обшивок и стенок, оценку общей устойчивости оболочки (как конструктивно-анизотропной оболочки с условно-однородным слоем стенок или по гипотезе «ломаной линии»), а также местной устойчивости элементов обшивок и стенок.
2. Составлены расчетные алгоритмы и разработаны программные средства для параметрического анализа и оптимизации композитных многостеночных оболочек.
3. На примере конкретного отсека разгонного блока проведен численный анализ влияния различных параметров на несущую способность конструкции. Показано, что при изменении проектных параметров каждый из рассмотренных механизмов исчерпания несущей способности может вызывать разрушение конструкции, и, таким образом, в проектных расчетах необходим учет всех этих механизмов.
4. Проведена сравнительная оптимизация двух типов силовых оболочек отсеков РН и РБ: многостеночных и трехслойных оболочек с сотовым заполнителем при действии осевой сжимающей силы. Построены границы предельных возможностей оптимальных конструкций «минимальная масса – максимальная несущая способность». Установлено, что конструктивная схема многостеночной оболочки является вполне конкурентоспособной для оболочечных конструкций ракетно-космической техники.
5. Развиты новые приемы наземных испытаний оболочечных конструкций РН, имитирующих их штатную эксплуатацию в условиях нестационарного температурного и силового воздействия. Проведено экспериментальное исследование характера деформирования и разрушения образцов многостеночных оболочек, и также оценена возможность сохранения их работоспособности при термосиловом нагружении. Установлено, что характеристики упругости образцов мало зависят от температуры, но прочностные характеристики значительно снижаются с увеличением температуры.
6. Полученные научные результаты внедрены в учебный процесс на кафедре «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Г.Э. Баумана.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Смердов А.А., Фан Тхе Шон Расчетный анализ и оптимизация многостеночных композитных несущих оболочек // Известия высших учебных заведений. М.: Машиностроение, 2014. № 4. С. 90-98. DOI: 10.18698/0536-1044-2014-11-90-98. (0,50 п.л. / 0,25 п.л.).
2. Смердов А.А., Фан Тхе Шон Особенности исследования многостеночных структур, применяемых в оболочечных конструкциях ракетно-космической техники // Сборник трудов XXXIII международная научно-практическая конференции «Научная дискуссия: вопросы технических наук». М., 2015. С. 38-45. (0,45 п.л. / 0,30 п.л.).
3. Смердов А.А., Фан Тхе Шон Сравнительная оценка двух методик расчета общей устойчивости многостеночных композитных оболочек // Сборник трудов Международной научно-практической конференции. Воронеж, 2015. С. 27-36. (0,60 п.л. / 0,40 п.л.).
4. Таирова Л.П., Фан Тхе Шон Экспериментальное исследование фрагментов многостеночных композитных оболочек при термосиловом воздействии // <http://technomag.edu.ru>: Наука и образование. М.: МГТУ им. Баумана, 2015. № 08. С. 87-99. DOI: 10.7463/0815.0791764. (0,75 п.л. / 0,4 п.л.).
5. Смердов А.А., Фан Т.Ш. Методы расчета многостеночных структур, применяемых в крупногабаритных ракетно-космических конструкциях // Научные материалы XLX научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Калуга, 2015. С. 31-32. (0,15 п.л. / 0,10 п.л.).
6. Таирова Л.П., Фан Тхе Шон Экспериментальное исследование фрагментов многостеночных композитных оболочек при термосиловом воздействии // Сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 2015. Ч2. С. 83-88. (0,30 п.л. / 0,20 п.л.).
7. Таирова Л.П., Фан Т.Ш. Экспериментальное исследование деформативных и прочных свойств фрагментов многостеночных композитных оболочек // Сборник трудов международной конференции «материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении». Томск: Изд-во ТПУ, 2015. С. 48-57. (0,60 п.л. / 0,30 п.л.).
8. Таирова Л.П., Фан Тхе Шон Экспериментальное исследование фрагментов многостеночных композитных оболочек при термосиловом воздействии // Научные труды IV международной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». М.: ИМАШ РАН, 2015. С. 251-254. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).
9. Фан Тхе Шон Оптимальное проектирование многостеночных силовых композитных оболочек отсеков ракет-носителей и разгонных блоков // Сборник тезисов всероссийской научно-технической конференции «механика и математическое моделирование в технике». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. С 359-363. (0,40 п.л. / 0,40 п.л.).
10. Смердов А.А., Фан Т.Ш. Сравнительный анализ оптимальных композитных оболочек многостеночной и трехслойной схем для отсеков ракет-носителей и разгонных блоков // Конструкции из композиционных материалов. М., 2016. №3. С.58-65. (0,50 п.л. / 0,25 п.л.).