

На правах рукописи



Склезнев Андрей Анатольевич

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ  
МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ КРИОГЕННЫХ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ  
ДЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Специальность 2.5.13.

«Проектирование, конструкция, производство, испытания  
и эксплуатация летательных аппаратов»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Хотьково – 2023

Работа выполнена в Акционерном обществе «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения»

**Научный консультант:** **Разин Александр Федорович** – доктор технических наук

**Официальные оппоненты:** **Азиков Николай Сергеевич** – доктор технических наук, профессор, ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова» Российской академии наук, главный научный сотрудник

**Ковалев Игорь Евгеньевич** – доктор технических наук, профессор, ФАУ «ЦАГИ» им. проф. Н.Е. Жуковского, начальник Управления научной деятельности

**Бурнышева Татьяна Витальевна** – доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», заведующий кафедрой прочности летательных аппаратов

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» (Университет Решетнёва), г. Красноярск

Защита диссертации состоится «19» октября 2023 г. в 10 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.327.09 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО МАИ (НИУ) и на сайте [https://www.mai.ru/events/defence/doctor/?ELEMENT\\_ID=174425](https://www.mai.ru/events/defence/doctor/?ELEMENT_ID=174425)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направить по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское ш., д.4, Отдел Ученого и диссертационных советов МАИ.

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



Д.Ю. Стрелец

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Существующие в настоящий момент основные конструктивные решения топливных баков космических носителей на жидком топливе представляют собой вафельные оболочки из металлических сплавов, изготовленные методом фрезерования. Конструкция вафельных баков является оболочкой вращения, состоящей из металлических панелей, имеющих обшивку с интегральным подкрепляющим набором рёбер, а также металлические днища (Рисунок 1). Технологический процесс изготовления криогенных топливных баков с несущей стенкой вафельной конструкции является исключительно трудоёмким. Используются толстостенные алюминиевые панели, в которых путём удаления материала химическим травлением, электрохимической обработкой или механическим фрезерованием формируются рёбра подкрепляющего набора. Полученные панели свариваются между собой, формируя несущую силовую оболочку бака. Недостатками являются: высокая трудоёмкость фрезерования панелей, необходимость наличия уникального технологического оборудования, особенно для изготовления баков больших длины и диаметра. Следует также отметить крайне низкий коэффициент использования материала (КИМ) в топливных баках вафельной конструкции, составляющий 7-8%.

Одним из путей повышения весового совершенства топливных криогенных баков перспективных ракет-носителей (РН) является применение в конструкции несущих топливных баков космических носителей армированных полимерных композитных материалов (ПКМ). В настоящее время имеются предпосылки для такого решения – в ракетах на твёрдом топливе доля силовых конструкций, выполненных из полимерных композиционных материалов с непрерывным армированием (корпуса транспортно-пусковых контейнеров, соединительные отсеки, головные обтекатели, сопловые блоки и корпуса ракетных двигателей твёрдого топлива) составляет около 80 %, а экономия веса по сравнению с аналогами из металлических сплавов составляет 25-30 %. Характерными особенностями РН среднего и тяжёлого класса являются сравнительно большие

габариты (диаметр РН Протон-М и перспективны РН среднего класса составляет 4.1 м), высокий уровень действующих нагрузок (I ступень проектируется на расчётную осевую эквивалентную сжимающую силу порядка 15 МН).

Альтернативой вафельным конструктивным схемам, в части восприятия силовых нагрузок на отсек, являются сетчатые конструкции, представляющие собой интегральную систему взаимопересекающихся однонаправленных рёбер. Композитный материал в такой конструкции работает вдоль волокон, что позволяет наиболее полно реализовать его характеристики.

В данный момент актуальной на государственном уровне задачей является снижение углеродного следа и повышения эффективности использования материалов и технологий, чему в большой степени посвящена настоящая работа и предлагаемая новая конструкторско-технологическая концепция металлокомпозитного криогенного топливного бака, позволяющая в конструкции перспективных РН повысить их весовую и экономическую эффективность, снизив трудоёмкость их изготовления. Использование в качестве герметизирующего слоя металлического лайнера позволит использовать имеющиеся в настоящий момент конструктивные и технологические решения по организации внутреннего конструктивного наполнения топливного бака (Рисунок 2).



Рисунок 1 – Бак вафельной конструкции РН «Ангара» в процессе изготовления

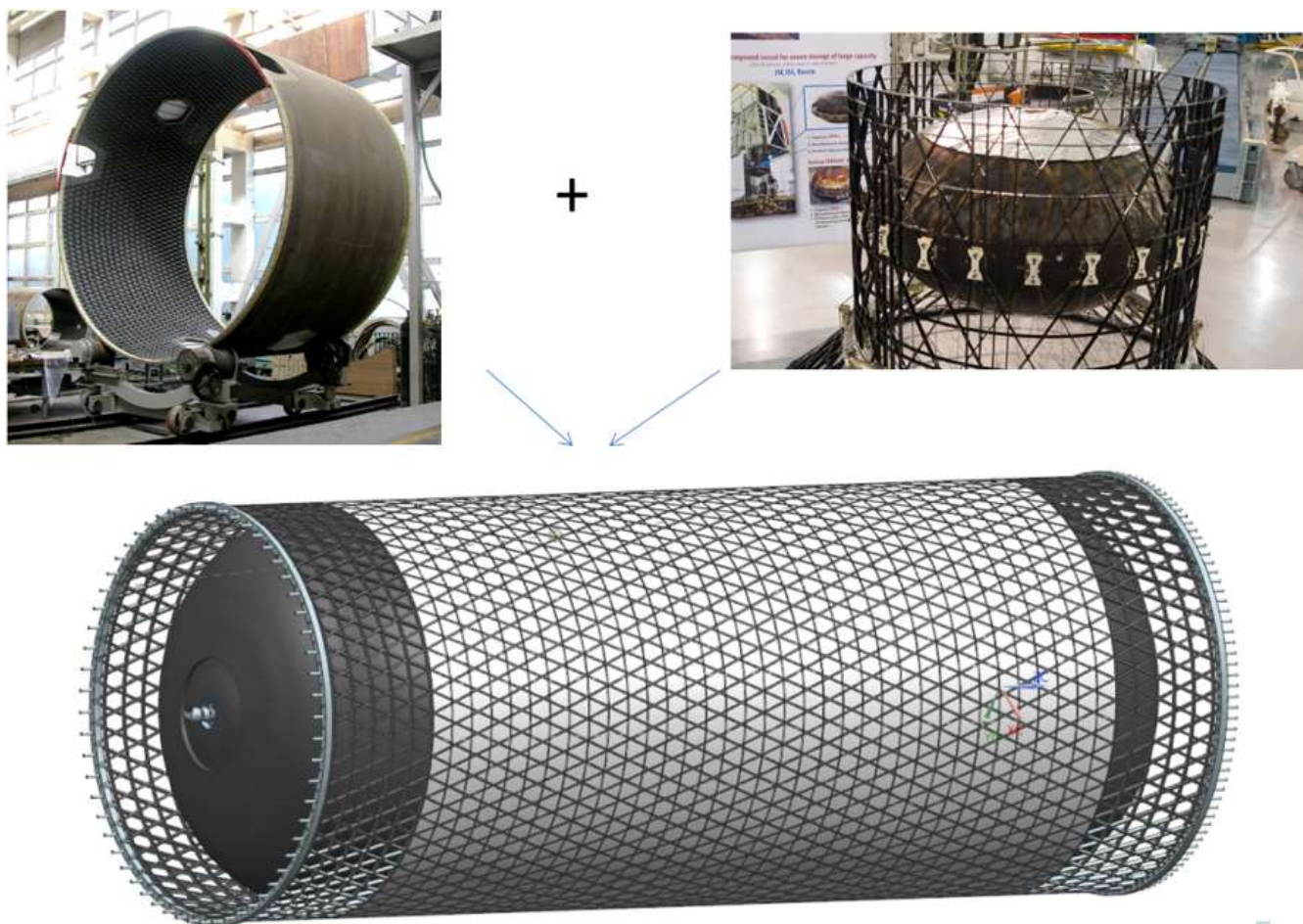


Рисунок 2 – Комбинированная конструкция топливного бака

Актуальность темы исследования обуславливается также возможностью снижения массы и трудоёмкости изготовления космических носителей путём применения новых конструкционных материалов и реализация новых конструктивно-силовых концепций элементов носителей с применением автоматизированных высокотехнологичных методов их изготовления, таких, как являющиеся по существу аддитивными, технологий намотки и выкладки.

### **Степень разработанности темы**

Рассматриваемая в работе тема к настоящему времени практически не исследовалась. Недостаточно изученными являлись:

– вопросы совместной работы разнородных материалов в диапазоне от криогенных до повышенных эксплуатационных температур;

– отсутствовали апробированная технология изготовления металлокомпозитных баков с несущей силовой стенкой и точное решение задач устойчивости металлического лайнера при намотке и термообработке;

– отсутствовали методики проектирования металлокомпозитных криогенных топливных баков.

**Решаемая в работе проблема** – создание новых научно обоснованных технических и технологических решений, которые вносят значительный вклад в развитие техники: создание новых энергоэффективных высокопрочных криогенных топливных баков на основе металлокомпозитных ёмкостей и силовых сетчатых структур, повышающих экономичность изделий ракетно-космической техники.

**Целью исследования** является разработка новой конструктивно-технологической концепции несущего металлокомпозитного криогенного топливного бака для повышения весовой и экономической эффективности конструкций космических носителей в результате решения комплексной проблемы проектирования, разработки технологии изготовления и экспериментальной отработки нового класса криогенных металлокомпозитных топливных баков летательных аппаратов.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

- 1 Анализ современного состояния исследований, методов проектирования и расчёта, технологий изготовления, экспериментальной отработки и эксплуатации криогенных топливных баков, изготовленных из металлических сплавов и композитных материалов.
- 2 Создание и экспериментальная отработка принципиально новой конструкции металлокомпозитного криогенного топливного бака летательного аппарата и оценка перспектив её применения.
- 3 Разработка методов оптимального проектирования и конструирования комбинированных интегральных конструкций несущих криогенных металлокомпозитных топливных баков.

- 4 Разработка и исследования оптимальных технологических и эксплуатационных параметров изготовления и применения металлокомпозитного криогенного топливного бака с учётом оценки устойчивости, прочности и целостности конструкции криогенного композитного топливного бака и его герметизирующего лайнера.
- 5 Решение технологических вопросов и экспериментальные исследования возможности создания системы непрерывного контроля напряжённо-деформированного и температурного состояния конструкции бака на всем жизненном цикле изделия при помощи волоконно-оптических измерительных систем.
- 6 Исследование и разработка технологии изготовления несущего металлокомпозитного криогенного топливного бака.
- 7 Экспериментальные исследования и внедрение конструкции и технологии изготовления несущего металлокомпозитного криогенного топливного бака для применения в перспективных ракетах-носителях.

**Научная новизна:**

- 1 Созданы и отработаны принципиально новые конструктивные решения криогенных топливных баков на основе металлокомпозитных ёмкостей и силовых сетчатых структур, отличающиеся интегральностью конструкции, повышающие весовую и экономическую эффективность изделий ракетно-космической техники (п.3 Паспорта научной специальности 2.5.13.).
- 2 Разработаны методы проектирования и теоретическая база с методическим (п.1, п.2 Паспорта научной специальности 2.5.13.) и программно-алгоритмическим обеспечением, позволяющим обеспечить выбор оптимального облика и параметров компоновки бака, требуемые запасы прочности, в т.ч.:
  - 2.1 Впервые решена теоретически (на основе нелинейных уравнений теории оболочек) и экспериментально подтверждена задача устойчивости цилиндрической оболочки при нагружении давлением, вызванным натяжением гибкой системы нитей.

- 2.2 Решена на основе нелинейных уравнений теории оболочек задача устойчивости тонкостенного лайнера, заключённого в композитный силовой слой при условии воздействия температурной обработки.
  - 2.3 Решена задача устойчивости лайнера бака, находящегося в жёсткой среде, при условии действия осевой сжимающей силы.
  - 2.4 Решена задача о взаимодействии сетчатой оболочки с наружными обшивками и металлическим лайнером, при условии учёта деформируемости сетчатой оболочки в радиальном направлении. Разработана математическая модель силовой стенки бака, позволяющая вычислить коэффициенты жёсткости и теплопроводности стенки бака, деформации и прогибы функциональных слоёв стенки бака.
  - 2.5 Разработана комплексная модель оценки прочности конструкции металлокомпозитного криогенного топливного бака, работоспособная на всех этапах жизненного цикла изделия, при проектировании, изготовлении, испытаниях и эксплуатации.
- 3 На основе теоретических исследований и разработанных моделей исследовано контактное взаимодействие между функциональными слоями силовой стенки металлокомпозитного криогенного бака интегральной конструкции, которое может привести к отслоению металлического лайнера при действии криогенных температур. Получены новые закономерности изменения контактных сил от изменения температуры и величины внутреннего давления .
  - 4 Исследовано влияние подкрепляющего шпангоута на контактные силы, возникающие между силовой композитной оболочкой и металлическим лайнером и установлен новый эффект: контактные силы, приводящие к отслаиванию лайнера и нарушению целостности конструкции при действии криогенных температур, значительно возрастают в зоне размещения шпангоута. Что позволяет снизить величину возникающих контактных сил при помощи модифицированной конструкции шпангоута (п.4 Паспорта научной специальности 2.5.13.).



Новизна полученных научных результатов подтверждена 2 патентами на изобретения (№№ 2749468, 2765630), а также государственной регистрацией программ для ЭВМ № 2015614050, № 2015614055, № 2021662511, №2021662801, № 2022617776.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в следующем:

- 1 Построены расчётные соотношения для оценки поведения функциональных слоёв стенки металлокомпозитного криогенного бака в широком диапазоне эксплуатационных температур и силового нагружения.
- 2 Получены расчётные соотношения для определения технологических параметров изготовления и эксплуатационных параметров металлокомпозитных криогенных топливных баков с учётом сохранения устойчивости и прочности тонкостенного металлического лейнера.
- 3 Разработана новая производственная технология изготовления металлокомпозитных криогенных топливных баков, заключающаяся в использовании металлокомпозитного бака в качестве технологической оснастки при изготовлении силовой сетчатой несущей структуры криогенного топливного бака.
- 4 Разработана производственная технология внедрения измерительных систем на основе волоконно-оптических датчиков в материал и конструкцию металлокомпозитных криогенных топливных баков без ухудшения прочностных свойств полимерного композитного материала.
- 5 На основе полученных практических результатов создано Программное обеспечение для расчёта технологических параметров изготовления металлокомпозитных криогенных топливных баков.

Практическая ценность и реализуемость полученных результатов подтверждена 2 патентами на изобретения и патентом на полезную модель, защищающими способы и соответствующие модели.

Результаты работы использованы на двух предприятиях России и в учебном процессе МАИ (НИУ).

**Объект исследования:** новый класс несущих металлокомпозитных криогенных топливных баков летательных аппаратов для создания перспективной ракетно-космической техники.

**Методология и методы исследования** основаны на использовании нелинейных уравнений теории оболочек, экспериментальных исследованиях и методах математической статистики для обработки результатов экспериментов, методах вычислительного эксперимента, основанных на методе конечных элементов.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1 Новые конструктивные решения криогенных топливных баков на основе металлокомпозитных ёмкостей и силовых сетчатых структур, отличающиеся интегральностью конструкции на границе металлический лайнер – композитная силовая оболочка, повышающие экономичность изделий ракетно-космической техники (п.3 Паспорта научной специальности 2.5.13.).
- 2 Методы проектирования и теоретическая база с методическим (п.1, п.2 Паспорта научной специальности 2.5.13.) и программно-алгоритмическим обеспечением, позволяющие обеспечить выбор оптимального облика и параметров компоновки бака, требуемые запасы прочности, в т.ч.:
  - 2.1 Решение на основе нелинейных уравнений теории оболочек задачи устойчивости металлического лайнера при намотке гибкой системы нитей с натяжением;
  - 2.2 Решение на основе нелинейных уравнений теории оболочек задачи устойчивости металлического лайнера, заключённого в композитный силовой слой при температурной обработке
  - 2.3 Расчёт на устойчивость лайнера бака от действия осевой сжимающей силы.
  - 2.4 Метод расчёта и оптимизации параметров несущей стенки криогенного бака с металлическим лайнером и наружной обшивкой, учитывающий деформируемость сетчатой оболочки по толщине. Математическая модель герметичной силовой стенки бака, позволяющая определить коэффициенты жёсткости бака, контактные силы между функциональными слоями, а также коэффициент теплопроводности стенки бака в радиальном направлении.

- 2.5 Комплексная модель оценки прочности конструкции металлокомпозитного криогенного топливного бака, работоспособная на всех этапах жизненного цикла изделия, при проектировании, изготовлении, испытаниях и эксплуатации.
- 3 Новые соотношения, определяющие контактные взаимодействия между функциональными слоями силовой стенки металлокомпозитного криогенного бака интегральной конструкции из условия недопустимости отслоения и потери устойчивости металлического лайнера при действии криогенных температур (п.4 Паспорта научной специальности 2.5.13.).
- 4 Исследование влияния контактных сил на возможное отслаивание металлического лайнера и нарушение целостности конструкции при действии криогенных температур в зоне размещения шпангоута (п.4 Паспорта научной специальности 2.5.13.).

**Степень достоверности** результатов и разработанных методов проектирования, а также полученных проектных параметров металлокомпозитного криогенного топливного бака подтверждается применением апробированных теоретических положений теории оболочек и механики композитов, прямым расчётом спроектированных конструкций методом конечных элементов и результатами экспериментального исследования модельных конструкций.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты, полученные при выполнении диссертации, докладывались на Расширенных заседаниях секции №9 Научно-технического совета Госкорпорации «Роскосмос», г. Королёв, 09.11.2021 г. и 13.07.2022 г., а также международных и всероссийских конференциях: XLIII Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий (г. Миасс, 2023), XXII Научно-технической конференции учёных и специалистов, посвящённой 60-летию полёта Ю.А. Гагарина, 75-летию ракетно-космической отрасли и основанию ПАО «РКК «Энергия» (Королёв, 2021), 10-й Всероссийской научной конференции «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» (Москва, 2020), 19-й Международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, 2020), XX Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации» (Пермь, 2019), 6-й Всероссийской научной конференции с международным

участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред им. И.Ф. Образцова» (Москва, 2016), 17 Европейской конференции по композиционным материалам ECCM17 (Германия, 2016); 8-м Международном аэрокосмическом конгрессе МАК`15 (Москва, 2015), Всероссийской научно-технической конференции «Новые Материалы и Технологии» (Москва, 2012), Международной конференции «Современные проблемы машиноведения» (Беларусь, 2012), I-й Международной конференции по «Механике нано-, микро и макро-композитных конструкций» (Италия, 2012).

**Личный вклад автора.** Автором предложена и апробирована новая конструктивно-технологическая концепция проектирования, изготовления и эксплуатации металлокомпозитных криогенных топливных баков. Осуществлена разработка алгоритмов и программ для использования в процессе создания и отработки натурных металлокомпозитных сетчатых криогенных баков, металлокомпозитных баллонов давления. При помощи разработанных алгоритмов и программ возможно осуществление проектирования конструкции и расчёта технологических режимов изготовления корпусов композитных баллонов. Изготовление и экспериментальные исследования металлокомпозитных сетчатых конструкций проведены под руководством и при непосредственном участии автора. Все основные результаты получены автором лично.

**Публикации.** Основное содержание диссертации отражено в 39 научных работах, в том числе: 12 статей в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ; две статьи, вошедшие в базу данных Scopus и три статьи в изданиях перечня ВАК по смежным специальностям. Одна публикация по материалам конференции проиндексирована в международной базе данных SCOPUS. Предложенные конструктивно-технологические решения защищены 2 патентами РФ на изобретения и патентом РФ на полезную модель, а также 5 свидетельствами о государственной регистрации Программ для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и заключения. Работа содержит 322 страницы машинописного текста, 144 рисунка. Список литературы включает 200 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится обоснование актуальности темы, сформулирована цель и задачи работы, её научная новизна и практическая значимость и изложено содержание диссертационной работы.

В первой Главе представлено описание конструкции несущих топливных баков, применяемых в ракетно-космической технике и разработанных в России и за рубежом, анализ их конструктивно-технологические особенностей, эффективности и областей применения.

Значительную часть Главы 1 занимает обзор конструкций из композиционных материалов, применяемых в настоящее время в ракетно-космической технике. В Главе рассмотрен имеющийся опыт в области проектирования, расчёта и технологической отработки изготовления металлокомпозитных баков и баллонов различного назначения. Отмечаются работы И.Ф. Образцова, В.В. Васильева, В.А. Бунакова, Н.Г. Мороза, В.П. Молочева, А.В. Азарова, Ф.К. Синьковского и др., посвящённые теории проектирования и расчёта ёмкостей давления, технологическим приёмам их изготовления, а также работы Francescato P., Gillet A., Leh D., Saffré Ph., Sapre S., Pareek K., Sarada P. и др., в которых отражён зарубежный опыт в этой области. Также рассмотрен обширный опыт проектирования, расчёта и технологической реализации силовых несущих сетчатых конструкций. Отмечаются работы В.В. Васильева, А.Ф. Разина, А.В. Азарова, А.В. Лопатина – в которых отражена история развития и основные полученные в области проектирования, расчёта и применения сетчатых конструкций результаты. Среди зарубежных авторов, работы которых рассмотрены в первой Главе в рассматриваемой области выделяются Totaro G., Hayashi T., Spina P., De Nicola F., Gurdal Z., Hunt C.J., Liu F., Feng R.-Q. и др.

В работе отмечены результаты, полученные McCarville D.A., Guzman J.C., Dillon A.K., Jackson J.R., Birkland J.O., посвящённые проектированию и изготовлению криогенного бака из композиционных материалов и анализируются плюсы и минусы такого конструктивно-технологического

исполнения бака. В заключительной части Главы 1 приводится постановка задачи разработки комбинированной конструктивно-силовой схемы интегрального металлокомпозитного криогенного топливного бака с несущей силовой оболочкой, работающего как на внутреннее давление, так и на внешние силы, а также эксплуатирующегося в широком диапазоне температур.

Во второй Главе рассмотрены вопросы оптимального проектирования металлокомпозитных криогенных топливных баков. Конструкция рассматриваемого в работе бака представлена на Рисунке 3. Внутри бака находится тонкостенный металлический лайнер (1), обеспечивающий герметичность и являющийся одновременно технологической оправкой, (2) – силовая композитная оболочка, находящаяся на лайнере и состоящая из спиральных и кольцевого силовых слоёв, воспринимающих эксплуатационное давление рабочего тела, (3) – лёгкий материал-заполнитель, необходимый для формообразования рёбер сетчатой структуры (4). Сетчатая структура предназначена для восприятия осевой силы. Наружная оболочка – (5) и стыковой шпангоут – (6) с отверстиями для механического крепления к смежным изделиям.

В Главе приведены характеристики композитных материалов, применяемых для проектирования и изготовления бака – углепластики на основе отечественных углеволокон и ткани производства Umatex, ГК Росатом и эпоксидного связующего ЭД-И, производства АО «ЦНИИСМ».

Рассмотрены две задачи проектирования конструкции металлокомпозитных баков – проектирование металлокомпозитной ёмкости на действие внутреннего давления и проектирование сетчатой структуры для восприятия внешних силовых факторов.

Толщина металлического лайнера принята заданной исходя из технологических особенностей его изготовления. При проектировании металлокомпозитного бака рассмотрено два варианта бака. Первый вариант с металлическими днищами (в том случае, когда толщины металлического лайнера оказывается достаточно для восприятия внутреннего давления). Если толщины металлического лайнера недостаточно, предложены соотношения, определяющие

необходимую толщину спиральных и кольцевых композитных слоёв, увеличивающих несущую способность тонкостенного лейнера (второй вариант бака). В Главе также приведены уравнения, при помощи которых определяется требуемая форма дна металлокомпозитного бака.

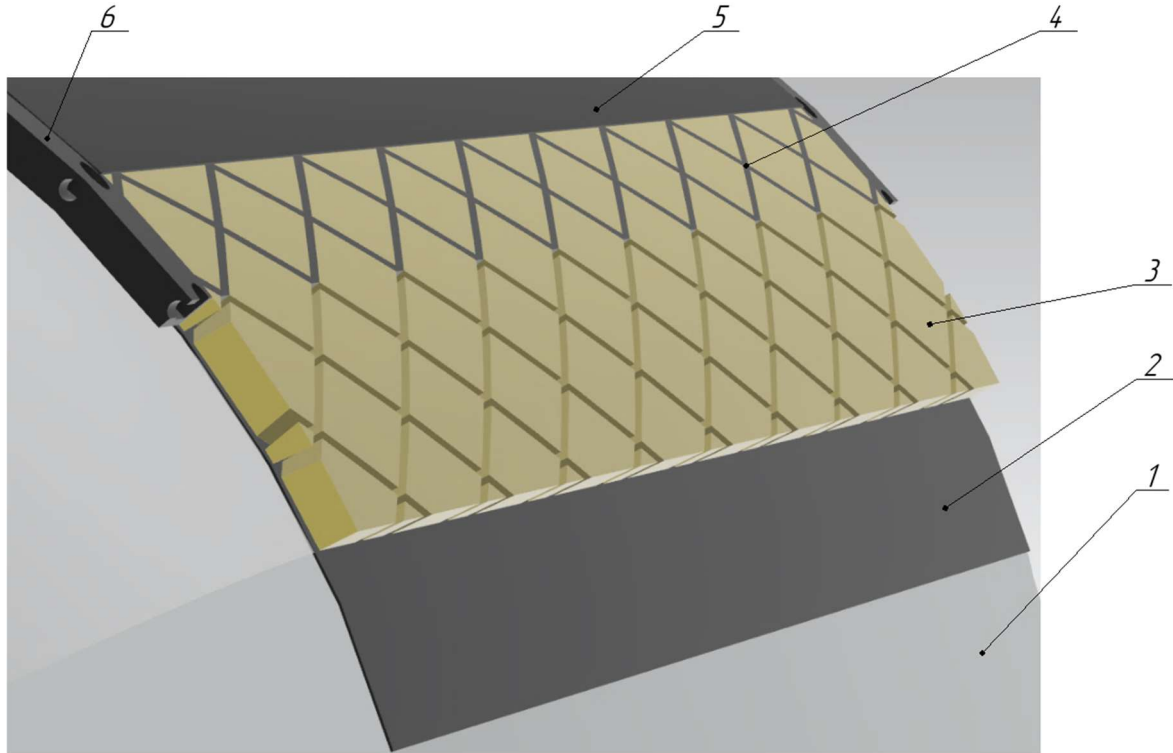


Рисунок 3 – Конструкция стенки металлокомпозитного топливного бака

1 – тонкостенный металлический лейнер, 2 – силовая композитная оболочка на металлическом лейнере, 3 – формообразующий лёгкий наполнитель, 4 – рёбра силовой сетчатой структуры, 5 – наружная композитная обшивка, 6 – торцевой силовой шпангоут с отверстиями для механического соединения

Для оптимизации сетчатой структуры (Рисунок 4) бака использован метод внутренней точки. В ходе оптимизации решалась задача с тремя проектными параметрами ( $h$ ,  $\bar{\delta}_\varphi$  и  $\bar{\delta}_{90}$ ), а четвёртый параметр, угол наклона спиральных рёбер  $\varphi$ , варьировался в заданном диапазоне. Здесь  $\bar{\delta}_\varphi = \delta_\varphi / a_\varphi$ ,  $\bar{\delta}_{90} = \delta_{90} / a_{90}$ , где  $h$  – толщина сетчатого слоя,  $\delta_\varphi$ ,  $\delta_{90}$  – ширина спиральных и кольцевых рёбер,  $a_\varphi$ ,  $a_{90}$  – расстояния между осями спиральных и кольцевых рёбер (Рисунок 4).

Такой подход позволил дополнительно определить характер изменения целевой функции и проектных параметров в окрестностях оптимального угла наклона рёбер. В качестве исходных данных задавалась начальная точка –

начальные значения параметров сетчатой структуры, заведомо удовлетворяющие ограничениям, определялись соответствующие им целевая функция – масса конструкции, её градиент  $\nabla M_{км} = (\partial M_{км} / \partial h, \partial M_{км} / \partial \bar{\delta}_\varphi, \partial M_{км} / \partial \bar{\delta}_{90})$ , и диапазоны изменения проектных параметров. Ограничения были представлены в виде

$$2\pi \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1}{P} h^2 \cos^2 \varphi \sqrt{E_\varphi E_{90} \bar{\delta}_\varphi \bar{\delta}_{90}} \geq n_{o\min}; \quad \frac{4}{3} \frac{1}{P} \pi^3 k E_\varphi R h \bar{\delta}_\varphi^3 \cos^4 \varphi \sin^2 \varphi \geq n_{l\min};$$

$$\frac{4\pi\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{1}{P} E_\varphi \bar{\delta}_\varphi h^2 \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{E_{90} \bar{\delta}_{90}}{2E_\varphi \bar{\delta}_\varphi \sin^4 \varphi}}} \geq n_{н\min}; \quad \frac{4\pi R}{P} \bar{\sigma} h \bar{\delta}_\varphi \cos^2 \varphi \geq n_{\varphi\min},$$

что позволяет задать также минимальные коэффициенты запаса  $n_{o\min}$ ,  $n_{н\min}$ ,  $n_{l\min}$ ,  $n_{\varphi\min}$  по каждой возможной форме разрушения. В результате оптимизации определяются проектные параметры конструкции, а также рассчитываются запасы по заданным ограничениям.

Для сравнения с традиционными металлическими баками в Главе разработан модифицированный метод оптимального проектирования металлических вафельных конструкций по условию минимума массы с ограничениями по прочности от осевой нагрузки и внутреннего давления, общей устойчивости и местной устойчивости полотна ячейки вафельной структуры.

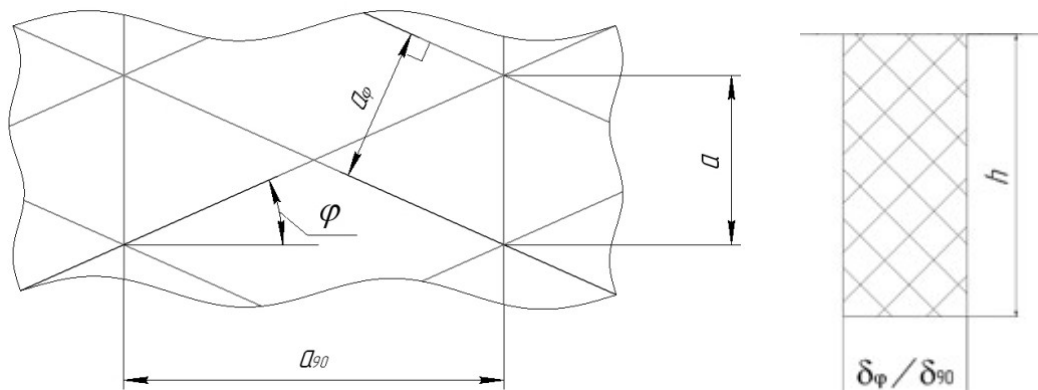


Рисунок 4 – Геометрические параметры сетчатой структуры

В Главе проведено проектирование модельного металлокомпозитного бака диаметром 1.0 м и длиной цилиндрической части 1.5 м: определена оптимальная геометрия днища бака, оптимальная схема армирования силовой оболочки на лейнере, определены оптимальные параметры сетчатой структуры силовой стенки бака.



Результаты полученных проектных параметров уточнены при помощи поверочного расчёта методом конечных элементов (КЭ, Рисунок 5). Согласно проведённым расчётам, минимальный запас по устойчивости силовой оболочки при действии расчётной осевой сжимающей силы составляет 1.13, а минимальный запас прочности рёбер сетчатой структуры составляет 1.06. КЭ модель, созданная для поверочного расчёта, включает в себя: шпангоут, моделирующийся при помощи трёхмерных элементов типа solid (свойства 3D ортотропного материала); лёгкий наполнитель, моделирующийся как и шпангоут при помощи трёхмерных элементов типа solid (свойства 3D изотропного материала); рёбра сетчатой структуры, моделирующиеся плоскими четырёхузловыми пластинами (элементами типа plate с ортотропными 2D свойствами материала); металлический лайнер в цилиндрической части, внутренняя композитная силовая оболочка и наружная композитная обшивка, моделирующиеся при помощи элементов типа плоских четырёхузловых и трёхузловых пластин (plate laminate) с заданной схемой армирования (толщины слоёв и углы армирования) с ортотропными 2D свойствами материалов для композита и изотропными свойствами материала для тонкостенного лайнера. Закрепление осуществляется в точках, соответствующих размещению штифто-шпилечного механического соединения – по 48 точек на каждом торцевом шпангоуте – по трём поступательным степеням свободы.

Полученный в Главе результат оптимизации вафельного алюминиевого бака даёт минимальную массу  $1 \text{ м}^2$  стенки бака 20.90 кг. Проектная масса  $1 \text{ м}^2$  поверхности цилиндрической оболочки спроектированного металлокомпозитного бака составляет 14,4 кг, что на 31.1% ниже массы вафельного бака. Проектная масса несколько отличается от массы  $1 \text{ м}^2$  КЭ модели (14,87 кг), что объясняется принятыми упрощающими допущениями при моделировании – не учитывается масса пенопласта, замещённого сетчатой структурой, и фактическое изменение плотности материала в местах пересечения рёбер. Таким образом, установлено, что весовая эффективность металлокомпозитного криогенного топливного бака превышает весовую характеристику вафельной оболочки из алюминиевых сплавов.

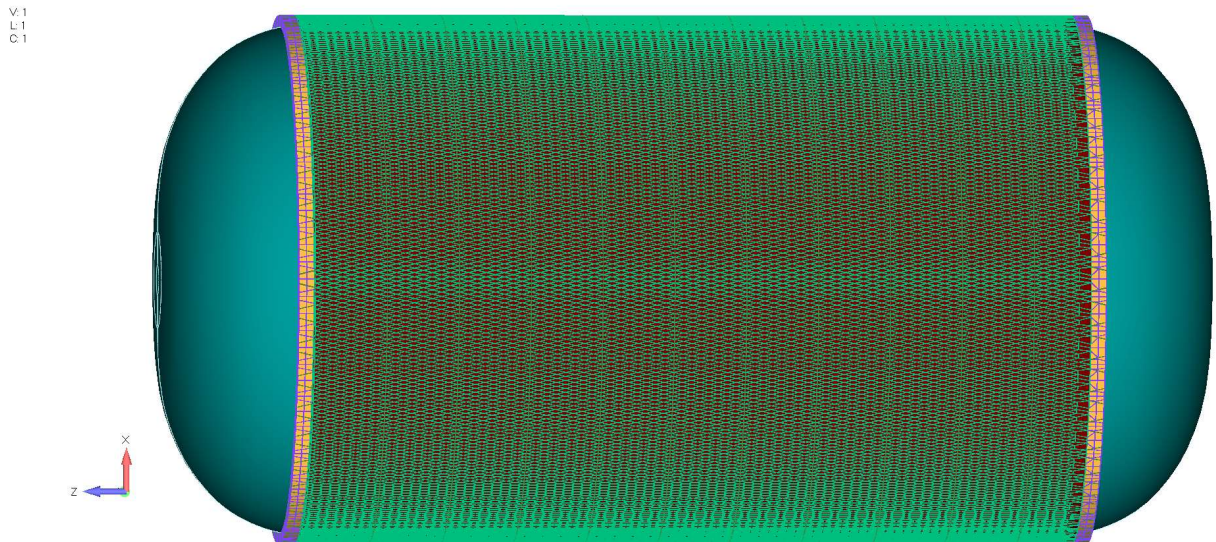


Рисунок 5 – Конечно-элементная модель расчёта спроектированного бака

Третья Глава посвящена разработке технологии изготовления металлокомпозитных криогенных топливных баков и решению технологических задач, возникающих при изготовлении таких баков. Технологическая схема изготовления металлокомпозитного криогенного бака представлена на Рисунке 6. Отличительной особенностью процесса изготовления является использование тонкостенного металлического лайнера в качестве технологической оснастки для выполнения операций намотки, термообработки, механической обработки бака.

В процессе технологической отработки модельного бака было выявлено несколько технологических факторов, существенно влияющих на физико-механические свойства материала и целостность конструкции бака в процессе изготовления. Для технологической подготовки производства металлокомпозитного криогенного топливного бака требовалось решение двух задач по обеспечению устойчивости лайнера.

Первая задача связана с обеспечением необходимой из технологических условий величины натяжения ленты в процессе автоматизированной «мокрой» намотки. Давление, вызванное намотанной с натяжением ленты, может вызвать потерю устойчивости лайнера, используемого в качестве оправки.

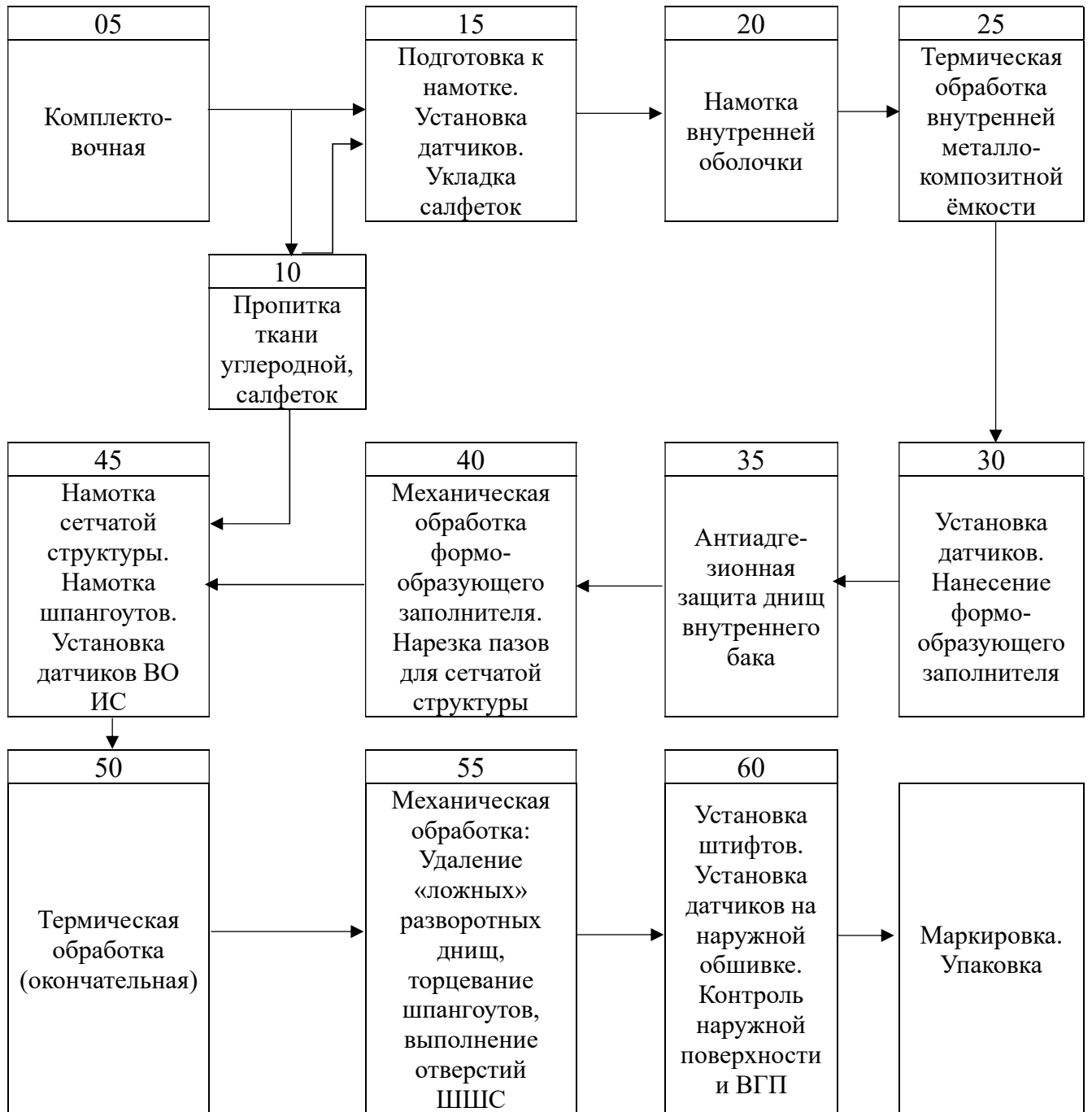


Рисунок 6 – Схема разработанного технологического процесса изготовления бака

Для решения этой задачи в работе определяются напряжения в металлическом лайнере, вызываемые намоткой силовых слоёв композитного материала, рёбер сетчатой структуры и наружной обшивки. В результате намотки всех слоёв стенки бака в лайнере возникают кольцевые сжимающие напряжения

$$\begin{aligned} \sigma_\beta = & -\frac{s_{90}^{(1)}h_{90}^{(1)}}{h_M} - \bar{E} \left( \frac{s_\varphi^{(1)}h_\varphi^{(1)}}{\bar{E}h + E_{90}h_{90}^{(1)}} \left[ (1-v^2)\sin^2\varphi_1 + v\frac{s_{90}^{(1)}h_{90}^{(1)}}{\bar{E}h}\cos^2\varphi_1 \right] - \right. \\ & - \frac{h}{B_2} \left[ \left( B_{11}^{(2)} - vB_{12}^{(2)} \right) \left( s_\varphi^{(p)}\bar{\delta}_\varphi \sin^2\varphi_p + s_{90}^{(p)}\bar{\delta}_{90} \cos^2\varphi_p \right) - \left( B_{12}^{(2)} - vB_{22}^{(2)} \right) s_\varphi^{(p)}\bar{\delta}_\varphi \cos^2\varphi_p \right] - \\ & \left. - \left( \left[ B_{11}^{(3)} - vB_{12}^{(3)} \right] / B_3 \right) s_\varphi^{(2)}h_\varphi^{(2)} \sin^2\varphi_2 \right). \end{aligned}$$

Здесь  $s_{90}^{(1)}$  – напряжение в кольцевом слое, вызванное его предварительным натяжением,  $h_{90}^{(1)}$  – толщина кольцевого слоя;  $h_M$  – толщина лайнера;  $s_\varphi^{(1)}$  – напряжение в спиральном слое с толщиной  $h_\varphi^{(1)}$  и углом  $\varphi_1$ ;  $s_\varphi^p, s_{90}^p$  – напряжения предварительного натяжения для спиральных и кольцевых рёбер;  $h$  – толщина сетчатого слоя;  $s_\varphi^{(2)}$  – натяжение наружной обшивки толщиной  $h_\varphi^{(2)}$  и углом  $\varphi_2$ . Жёсткостные параметры стенки бака определяются при помощи следующих соотношений:

$$B_{11}^{(1)} = \bar{E}h, \quad B_{12}^{(1)} = v\bar{E}h, \quad B_{22}^{(1)} = \bar{E}h + E_{90}h_{90}^{(1)}, \quad \bar{E} = E/(1-v^2), \quad B_1 = \bar{E}h(\bar{E}h + E_{90}h_{90}^{(1)}).$$

$$B_{11}^{(2)} = \bar{E}h + E_\varphi h_\varphi^{(1)} \cos^4\varphi_1, \quad B_{12}^{(2)} = v\bar{E}h + E_\varphi h_\varphi^{(1)} \sin^2\varphi_1 \cos^2\varphi_1, \quad B_{22}^{(2)} = \bar{E}h + E_{90}h_{90}^{(1)} + E_\varphi h_\varphi^{(1)} \sin^4\varphi_1.$$

$$B_2 = \bar{E}h \left[ \bar{E}h(1-v^2) + E_{90}h_{90}^{(1)} \right] + E_\varphi h_\varphi^{(1)} E_{90}h_{90}^{(1)} \cos^4\varphi_1 + \bar{E}h E_\varphi h_\varphi^{(1)} (1-2(1+v)\sin^2\varphi_1 \cos^2\varphi_1).$$

$$B_{11}^{(3)} = \bar{E}h + E_\varphi h_\varphi^{(1)} \cos^4\varphi_1 + E_p h_p \bar{\delta}_\varphi \cos^4\varphi_p,$$

$$B_{12}^{(3)} = v\bar{E}h + E_\varphi h_\varphi^{(1)} \sin^2\varphi_1 \cos^2\varphi_1 + E_p h_p \bar{\delta}_\varphi \sin^2\varphi_p \cos^2\varphi_p,$$

$$B_{22}^{(3)} = \bar{E}h + E_{90}h_{90}^{(1)} + E_\varphi h_\varphi^{(1)} \sin^4\varphi_1 + E_p h_p (\bar{\delta}_\varphi \sin^4\varphi_p + \bar{\delta}_{90}), \quad B_3 = B_{11}^{(3)} B_{22}^{(3)} - (B_{12}^{(3)})^2.$$

Определяется критическая величина натяжения, которая может привести к потере устойчивости лайнера. Для решения использованы нелинейные уравнения теории цилиндрических оболочек. Особенностью теории является форма уравнений равновесия, при выводе которых предполагается, что помимо деформаций малыми являются и углы поворота нормали к срединной поверхности оболочки. Учитываются только производные от углов поворота, т.е. при выводе уравнений равновесия учитывается изменение кривизны поверхности оболочки. уравнения равновесия записываются следующим образом (Рисунок 7)

$$N' + Q(1+\omega') = 0, \quad Q' - N(1+\omega') = q_T, \quad M' - RQ = 0, \quad (\cdot)' = d(\cdot)/d\alpha. \quad (1)$$

соотношения упругости

$$N = B\varepsilon_\alpha, \quad M = D\omega'/R, \quad B = \bar{E}h, \quad (2)$$

где  $D = \bar{E}h^3/12$ ,  $\bar{E} = E/(1-\nu^2)$ . Геометрические соотношения

$$\varepsilon_\alpha = (u' + w)/R + \omega^2/2, \quad \omega = (u - w')/R. \quad (3)$$

Здесь  $N$ ,  $Q$ ,  $M$  – кольцевое усилие, поперечное усилие и изгибающий момент, положительные направления которых показаны на Рисунке 7,  $u_\alpha$ ,  $w$  – кольцевое перемещение и прогиб, направленный по наружной нормали,  $\omega_\alpha$  – угол поворота нормали к поверхности оболочки.

Получено универсальное выражение для критического натяжения, зависящего от радиуса, изгибной жёсткости оболочки  $D$  и параметра  $\lambda_{cr}^2$ , расчётное значение которого составляет 732. Полученное решение,

$$\sigma_{cr} = \frac{\lambda_{cr}^2 D}{R^2 h},$$

подтверждено экспериментально (Таблица 1) на модельных оболочках из алюминия, стали и термопласта. Установлено, что значение параметра  $\lambda_{cr}^2$  отличается от расчётного значения на 1.2%.

Вторая задача связана с обеспечением устойчивости тонкостенного лейнера, заключённого в композитный силовой слой при температурной обработке. В металлическом лейнере криогенного топливного бака при нагревании заготовки бака для отверждения полимерного композиционного материала в термопечи образуются сжимающие напряжения.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований устойчивости кольцевых образцов, изготовленных из различных материалов

Материал оболочки	$R$ , мм	$h$ , мм	$T_{кр}$ , Н/мм	$\sigma_{кр}$ , МПа	$E$ , ГПа	$\nu$	$\lambda_{cr}^2$
Алюминий	42.00	0.165	12.50	75.8	72.1	0.3	753
Алюминий	31.50	0.096	4.44	46.3	72.3	0.3	741
Сталь	50.02	0.183	37.33	204	222	0.3	736
Термопласт	40.10	0.242	3.13	12.9	5.22	0.4	739
Термопласт	40.14	0.232	2.57	11.1	5.10	0.4	739
Термопласт	40.40	0.260	3.94	15.2	5.26	0.4	737

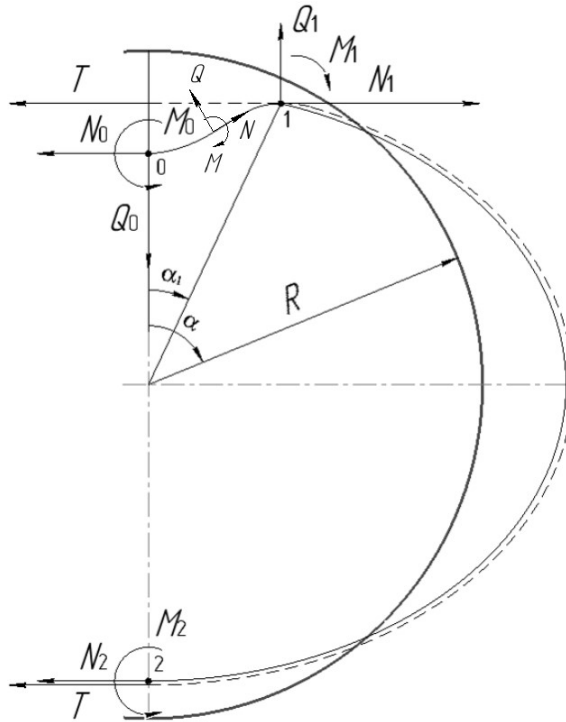


Рисунок 7 – Условия нагружения и деформированное состояние оболочки. Толстая линия – состояние оболочки до нагружения, тонкая линия – деформированное состояние оболочки, штриховая линия – положение системы гибких нитей

Это связано с тем, что коэффициент температурного расширения металлического лайнера, как правило, значительно больше, чем у композиционных материалов, применяемых в силовых слоях бака. Возникающие напряжения могут вызвать потерю устойчивости лайнера, которая проявляется в отслоении лайнера от наружной композитной оболочки (Рисунок 8).

В работе определены температурные деформации, возникающие в металлическом лайнере в процессе отверждения. Для этого использованы уравнения термоупругости для безмоментной цилиндрической оболочки:

$$B_{11}\varepsilon_\alpha + \frac{B_{12}}{R}w - B_{1T}\Delta T = \frac{pR}{2}; \quad B_{12}\varepsilon_\alpha + \frac{B_{22}}{R}w - B_{2T}\Delta T = pR.$$

Здесь  $p$  – внутреннее давление,  $\Delta T$  – изменение температуры в процессе термообработки, а также введены следующие обозначения, имеющие смысл коэффициентов жёсткостей и температурной деформации:

$$\begin{aligned} B_{11} &= \bar{E}h_M + A_{11}^\varphi h_\varphi^{o1} + A_{11}^{90} h_{90}^{o1} + 2E_\varphi^p \bar{\delta}_p \cos^4 \varphi_p h + A_{11}^{o2} h_{o2}; \\ B_{12} &= \bar{E}h_M \nu + A_{12}^\varphi h_\varphi^{o1} + A_{12}^{90} h_{90}^{o1} + 2E_\varphi^p h \bar{\delta}_p \sin^2 \varphi_p \cos^2 \varphi_p + A_{12}^{o2} h_{o2}; \\ B_{22} &= \bar{E}h_M + A_{22}^\varphi h_\varphi^{o1} + A_{22}^{90} h_{90}^{o1} + E_\varphi^p h (2\bar{\delta}_p \sin^4 \varphi_p + \bar{\delta}_{90}) + A_{22}^{o2} h_{o2}; \end{aligned}$$

$$B_{1T} = \bar{E}h_M(1+\nu)\alpha + A_{1T}^\varphi h_\varphi^{o1} + A_{1T}^{90} h_{90}^{o1} + 2E_\varphi^p h \bar{\delta}_p \cos^2 \varphi_p \alpha_1^p + A_{1T}^{o2} h_{o2};$$

$$B_{2T} = \bar{E}h_M(1+\nu)\alpha + A_{2T}^\varphi h_\varphi^{o1} + A_{2T}^{90} h_{90}^{o1} + E_\varphi^p h (2\bar{\delta}_p \sin^2 \varphi_p + \bar{\delta}_{90}) \alpha_1^p + A_{2T}^{o2} h_{o2}.$$

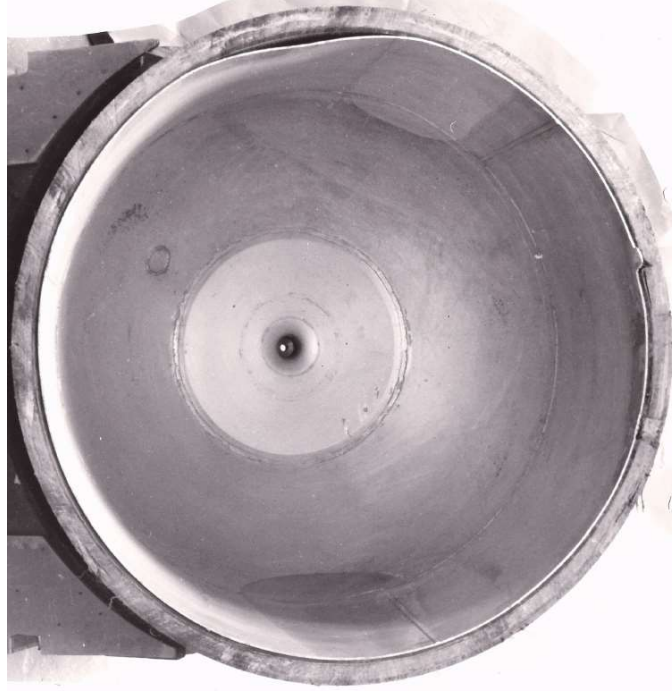


Рисунок 8 – Отслоение металлического лайнера после потери устойчивости в процессе термообработки

В результате решения, получены выражения, определяющие осевую и кольцевую деформации стенки бака и действующее на лайнер контактное давление:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{1}{B_{11}} \left( \frac{pR}{2} - \frac{B_{12}}{R} w + B_{1T} \Delta T \right); \quad \varepsilon_M^{\Delta T} = \frac{pRB_{11} + (B_{11}B_{2T} - B_{12}B_{1T}) \Delta T}{B_{22}B_{11} - B_{12}^2};$$

$$q_1 = \frac{\bar{E}h_M}{R} \left[ \left( \frac{\nu}{2B_{11}} + \frac{B_{11}}{B_{22}B_{11} - B_{12}^2} \right) pR - \nu \frac{B_{12}}{B_{11}R} w + \left( \frac{(B_{11}B_{2T} - B_{12}B_{1T})}{B_{22}B_{11} - B_{12}^2} + \nu \frac{B_{1T}}{B_{11}} - (1+\nu)\alpha \right) \Delta T \right] - p.$$

Задача устойчивости металлического лайнера в процессе обжатия композитным слоем решается при помощи нелинейных уравнений (1)–(3). Эти уравнения дополнены уравнениями равновесия участка 0-1 (Рисунок 9) как твёрдого тела.

$$-N_0 + Q_1 \sin \alpha_1 + N_1 \cos \alpha_1 = 0,$$

$$Q_1 \cos \alpha_1 - N_1 \sin \alpha_1 = 0,$$

$$-N_0(R - \delta) + N_1 R - M_0 + M_1 = 0.$$

Критическая деформация имеет вид

$$\varepsilon_{cr} = \frac{\eta^2 \cos \alpha_1}{12\alpha_1^2} \left( \frac{h}{R} \right)^2,$$

где  $\eta$  – параметр нагружения, определяющийся из уравнения  $\operatorname{tg} \eta = \eta$ , и имеющий минимальное значение  $\eta = 4.4892$ . Угол  $\alpha_1$  зависит от жёсткости оболочки и угла  $\alpha^*$  (Рисунок 9), определяющего длину участка оболочки, на котором она проскальзывает относительно наружного композитного слоя. Зависимости критической деформации от относительной толщины оболочки при различных значениях  $\alpha^*$  показаны на Рисунке 10. Точки соответствуют опубликованным результатам эксперимента для оболочек из нержавеющей стали, с наружным слоем из углепластика. Из Рисунка 10 следует, что для таких оболочек  $\alpha^* = \pi / 7$ . Критическая деформация оболочки аппроксимируется соотношением

$$\varepsilon_{cr} = C \left( \frac{h}{R} \right)^{1.2},$$

где  $C$  – некоторый коэффициент. Для  $\alpha^* = \pi / 7$  (Рисунок 10), получено значение  $C = 0.73$ . Полученная полуэмпирическая формула может быть использована для сравнения критической деформации внутренней оболочки с деформацией, возникающей от воздействия перепада температур во время термообработки. При выполнении соотношения  $\varepsilon_{cr} < \varepsilon_M^{\Delta T}$ , внутренняя герметизирующая оболочка сохраняет устойчивость.

Ещё одна из основных технологических проблем связана с использованием для формообразования рёбер сетчатой структуры не удаляемого после намотки конструкционного пенопласта взамен традиционно используемых удаляемых резиновых матриц. В результате проведённых экспериментальных исследований образцов материала установлено (Рисунок 11), что использование конструкционного пенопласта с выполненными в нём механическим способом формообразующими пазами для формирования однонаправленных рёбер сетчатой



структуры приводит в среднем к снижению прочности материала рёбер на 20% по сравнению с материалом, сформированном в матрице.

Кроме этого, механическое повреждение пенопласта, вызванное обработкой фрезерованием, служит причиной удерживания значительного количества связующего, способствуя таким образом, увеличению веса конструкции в среднем на 12% по сравнению с массой конструкции, сформированной в эластичных резиновых матрицах. В работе предложено два способа возможного решения этой проблемы: предлагается проводить не механическое формирование пазов в пенопласте, а использовать для этого термоножи, не вызывающие механического повреждения краёв паза. Оплавление краёв паза препятствует проникновению связующего внутрь формообразующего материала. Альтернативным вариантом решения является введение дополнительного технологического перехода между механическим вырезанием пазов и намоткой сетчатой структуры. Предлагается обработка пазов полимерным связующим. После отверждения связующего образуется жёсткая граница, препятствующей проникновению связующего в пенопласт в процессе намотки рёбер.

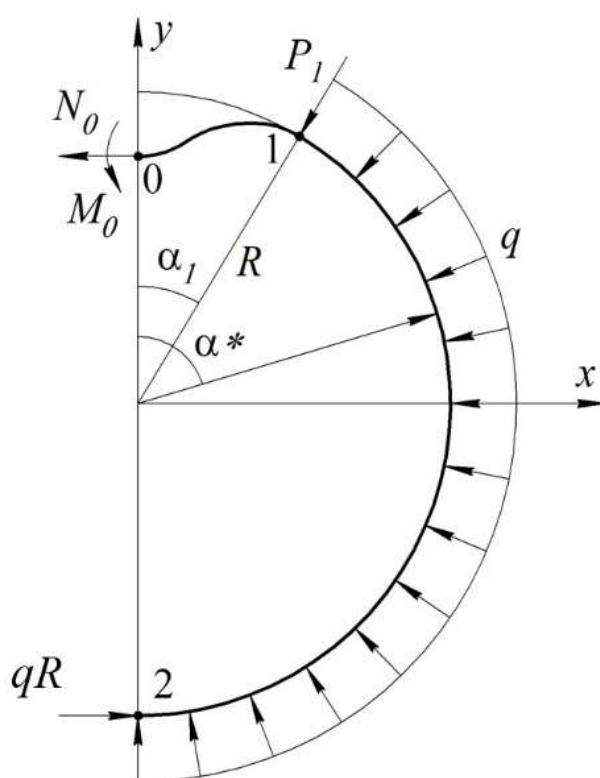


Рисунок 9 – Условия нагружения внутренней оболочки

Рассматриваются проблемы внедрения измерительных систем в материал и конструкцию бака. Предлагается использование оптоволоконных датчиков на основе решёток Брэгга (Рисунок 12) для измерения деформаций и температур в режиме реального времени во время проведения испытаний и эксплуатации бака. Представлены результаты технологической отработки такого размещения датчиков, показывающие принципиальную достижимость сохранения выводов и коннекторов измерительных систем неповреждёнными и функционирующими в последовательных процессах: намотки, термообработки, механической обработки и проведения испытаний бака.

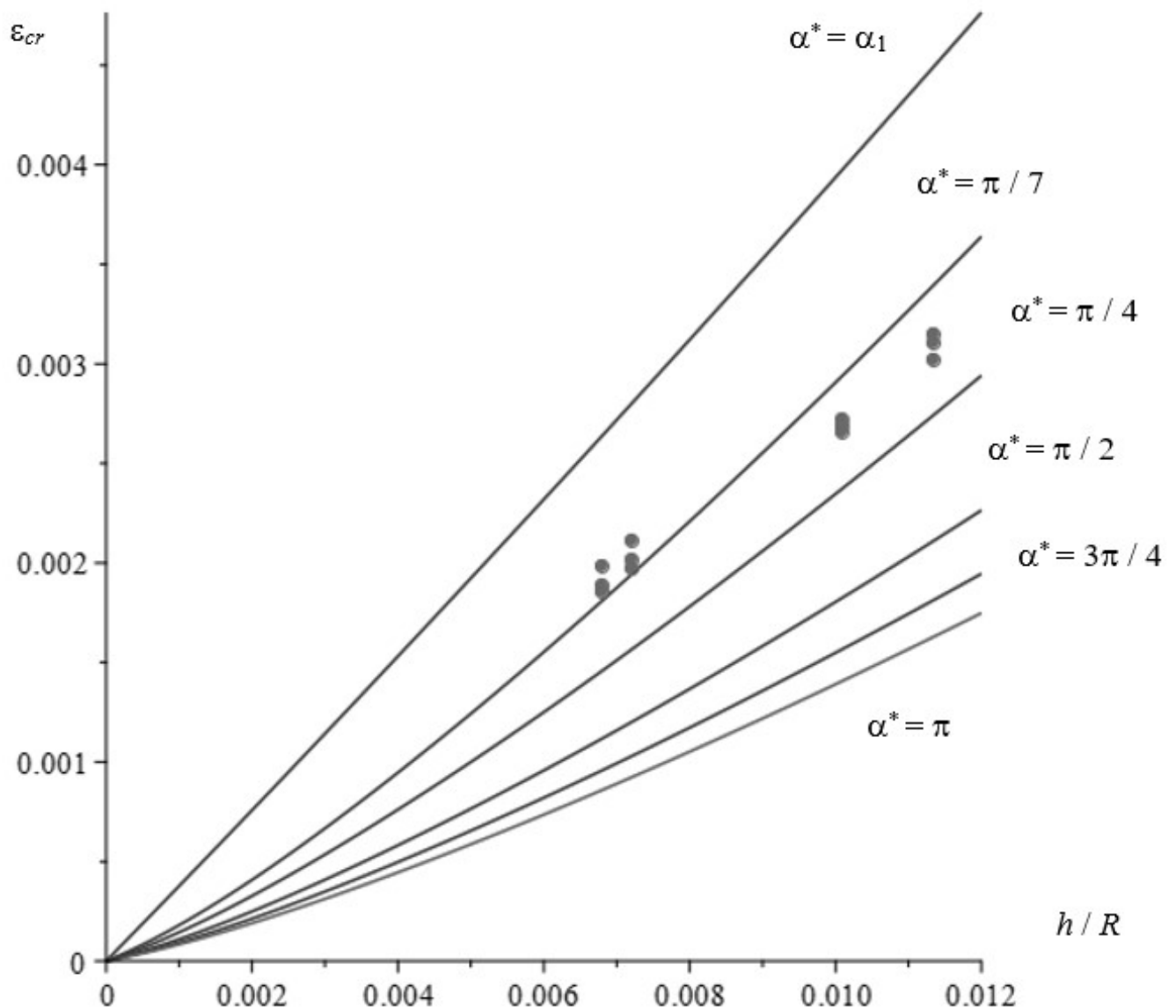


Рисунок 10 – Зависимость критической деформации от  $h/R$  при различном значении угла  $\alpha^*$



а

б

в

Рисунок 11 – Исследования влияния формообразующего материала на характеристики рёбер сетчатой структуры: использование резиновых подложек (а), пенопласта (б), испытания образцов рёбер (в)

В четвертой Главе рассмотрены задачи, связанные с эксплуатацией металлокомпозитных криогенных топливных баков. Определены коэффициенты жёсткости и коэффициент температурного расширения стенки бака, учитывающие температурную деформацию сетчатого слоя по его толщине. Найдены контактные напряжения, действующие между слоями при охлаждении бака и внутреннем давлении.

В Приложении А диссертации приведён программный код для определения напряжённо-деформированного состояния бака. В Таблице 2 представлены значения прогибов, контактных сил и деформаций для двух расчётных случаев:

- Заполнение бака криогенным топливом (в роли рабочего тела выступает жидкий азот) при нормальных начальных условиях ( $\Delta T = -216$  К);
- Наддув бака при нормальных начальных условиях до эксплуатационного значения внутреннего давления 0.5 МПа.

Использованы следующие параметры для модельной оболочки, полученные в результате проектирования в Главе 2: толщина титанового лайнера 1.0 мм, толщина спиральных слоёв «о1» – 0.6 мм, толщина кольцевого слоя «о1» 0.3 мм, толщина спиральных слоёв «о2» – 0.25 мм. Параметры сетчатой структуры: количество пар рёбер – 48; угол наклона спиральных рёбер –  $13^\circ$ ; ширина спиральных рёбер 8 мм; ширина кольцевых рёбер 4 мм; высота сетчатой структуры,

$h = 19$  мм. Также использованы свойства материалов, применённых для проектирования модельного бака.



Рисунок 12 – Размещение защищённых выводов оптоволоконной измерительной системы в технологической зоне модельного бака при его изготовлении

Как следует из представленных результатов, внутренний наддув определённой величины практически полностью компенсирует возникающие в слоях оболочки бака контактные давления из-за криогенных температур, вызывающих расслоение силовой оболочки.

При помощи уравнений, не учитывающих температурное деформирование сетчатого слоя по толщине (погрешность, внесённая таким упрощением модели стенки бака, составляет около 10%), оценено влияние шпангоута (Рисунок 13) на контактные силы, вызывающие отслоение лайнера.

Радиальное перемещение оболочки (см. Рисунок 13), нагруженной внутренним давлением, осевой силой и краевыми усилиями  $Q_R$  в соответствии с условиями сопряжения оболочки и шпангоута, имеет вид

$$w = w_0 - \frac{w_0 - \frac{R^2}{B_{un}} pa_{un} - R\alpha_{un}\Delta T}{1 + \frac{2D_{11}R^2}{B_{un}} \left(1 + \frac{C_{12}}{RK_x b}\right) (r^2 + 7t^2)r} e^{-rx} \left( \cos tx + \frac{r}{t} \sin tx \right).$$

Здесь  $B_{un}$  – жёсткость шпангоута с учётом соприкасающейся с ним части оболочки.

На Рисунке 14 представлена функция прогиба, соответствующая решению для упругого шпангоута и решению для абсолютно жёсткого шпангоута (штриховая линия) для модельного бака.

Выражение для контактного давления на металлический лайнер в зоне шпангоута имеет вид

$$q = \left[ \begin{aligned} & \bar{E} \left[ 1 - \frac{\nu B_{12}}{B_{11}} \right] \left[ \frac{w_0 - \left( \frac{w_0}{R} - \frac{R}{B_{un}} pa_{un} - \alpha_{un}\Delta T \right) e^{-rx} \left( \cos tx + \frac{r}{t} \sin tx \right)}{1 + \frac{2D_{11}R^2}{B_{un}} \left(1 + \frac{C_{12}}{RK_x b}\right) (r^2 + 7t^2)r} + \frac{\nu}{B_{11}} N \right] + \frac{h_M}{R} - p. \\ & + \left[ \bar{E} \frac{\nu B_{1T}}{B_{11}} - (1 + \nu)\alpha \right] \Delta T \end{aligned} \right]$$

Для снижения влияния шпангоута на контактное давление предложено использование модифицированного шпангоута с управляемым КЛТР и жёсткостью (Рисунок 15). Жёсткость и КЛТР такого шпангоута могут быть определены при помощи соотношений

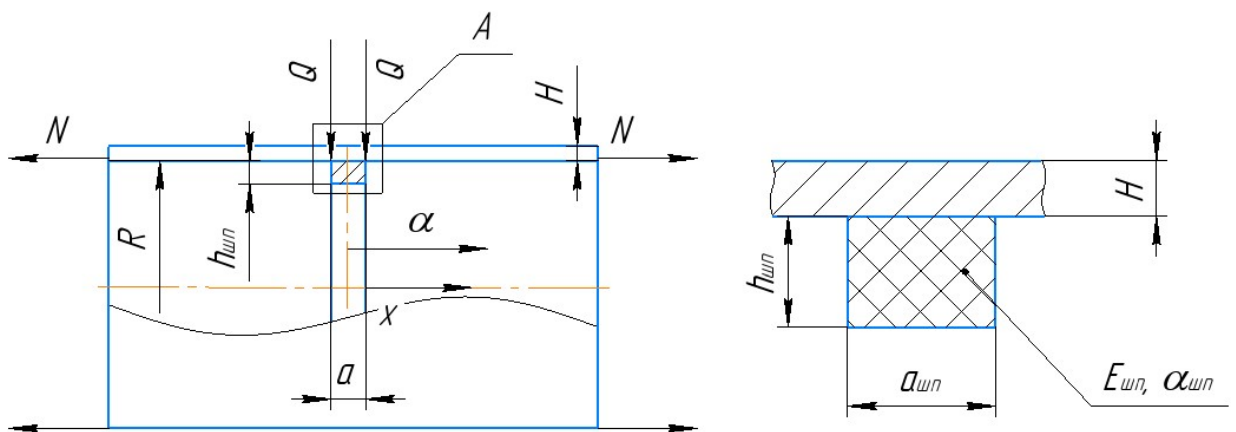


Рисунок 13 – Геометрические характеристики упругого шпангоута и действующие на него силы

Таблица 2 – Значения прогибов, контактных сил и деформаций для рассматриваемых расчётных случаев

Значение	Расчётный случай 1, $\Delta T = -216 \text{ К}, p = 0$	Расчётный случай 2, $\Delta T = 0, p = 500 \text{ кПа}$
Прогиб герметизирующего лайнера, $w_1$ , мм	- 0.500	0.447
Прогиб наружной оболочки, $w_2$ , мм	- 0.488	0.450
Контактное давление между силовой композитной оболочкой и металлическим лайнером, $q_1$ , кПа	315.300	- 302.245
Контактное давление между силовой композитной оболочкой и сетчатой структурой, $q_2$ , кПа	124.217	- 124.013
Контактное давление между сетчатой структурой и наружной оболочкой, $q_3$ , кПа	83.648	- 69.702
Кольцевая деформация герметизирующего лайнера и силовой композитной оболочки, $\varepsilon_{\beta}^M = \varepsilon_{\beta}^{o1}$ , %	- 0.095	0.085
Радиальная деформация сетчатой структуры, $\varepsilon_{\gamma}^p$ , %	0.033	- 0.027
Кольцевая деформация наружной обшивки, $\varepsilon_{\beta}^{o2}$ , %	- 0.092	0.08
Осевая деформация стенки бака, $\varepsilon_{\alpha}$ , %	- 0.021	0.01

$$\alpha_{un}^* = \alpha_M \frac{\delta(a + 2(H - \delta))}{aH} + \alpha_{KM} \left( 1 - \frac{\delta(a + 2(H - \delta))}{aH} \right).$$

$$B_{un}^* = E_M \frac{\delta(a + 2(H - \delta))}{aH} + E_1^{KM} \left( 1 - \frac{\delta(a + 2(H - \delta))}{aH} \right);$$

Эксплуатационные нагрузки для баков могут быть приведены к эквивалентной осевой сжимающей силе, от действия которой в композитной стенке бака и в лайнере возникают сжимающие напряжения. Такие напряжения могут привести к потере устойчивости лайнера, приводящей к его отслоению от наружной силовой композитной оболочки (Рисунок 16).

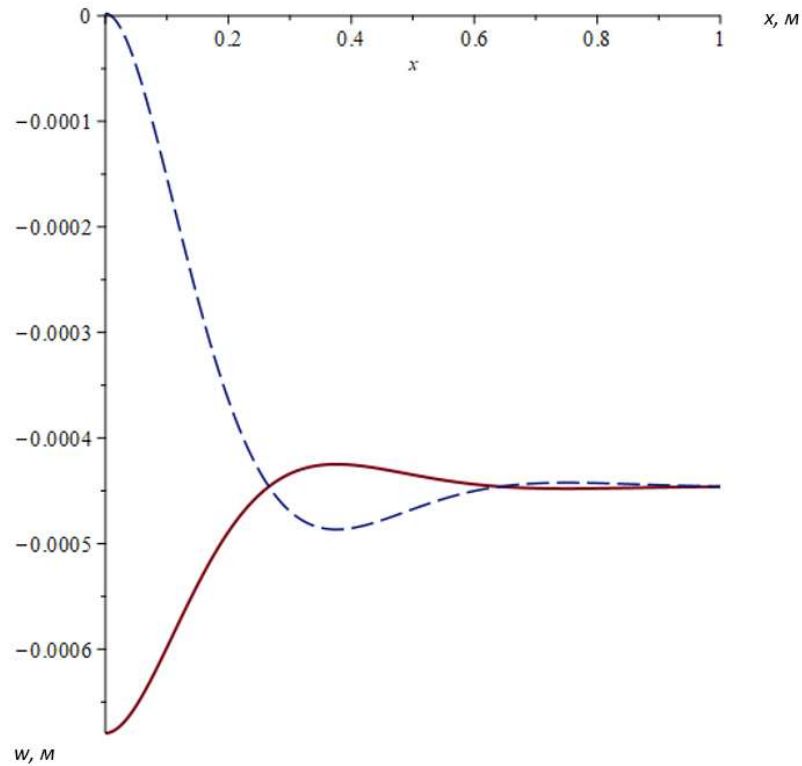


Рисунок 14 – Прогиб стенки бака, соответствующий решению для упругого шпангоута (сплошная линия) и решению для абсолютно жёсткого шпангоута (штриховая линия), при  $\Delta T = -216$  К

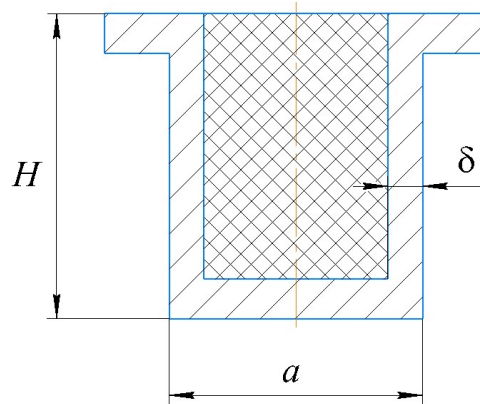


Рисунок 15 – Конструкция шпангоута с управляемой кольцевой жёсткостью.

Уравнение устойчивости имеет вид

$$\left(1 + (\bar{w}')^2\right) \bar{w}^{IV} + 2\bar{w}'\bar{w}''\bar{w}''' - \nu\bar{w}'\bar{w}'''' + \frac{\bar{E}hR^2}{D}\bar{w} + \frac{NR^2}{D}(\bar{w}'' - \nu) = 0.$$

При помощи метода Бубнова-Галёркина получено приближённое решение задачи устойчивости лайнера при осевом сжатии бака. Получена критическая деформация  $\epsilon$ , которая может привести к потере устойчивости лайнера

$$\varepsilon = \frac{8\bar{l}^4 r + 21}{24\bar{l}^2 r (1 - \nu^2)},$$

где  $\bar{l} = l / R$ ,  $r = R^2 / h^2$ . Величина  $\bar{l}$  определяется из условия минимума  $\varepsilon$ .

В результате минимизации деформации получено выражение для критической деформации

$$\varepsilon_{cr} = \frac{7}{\sqrt{42r} (1 - \nu^2)}.$$

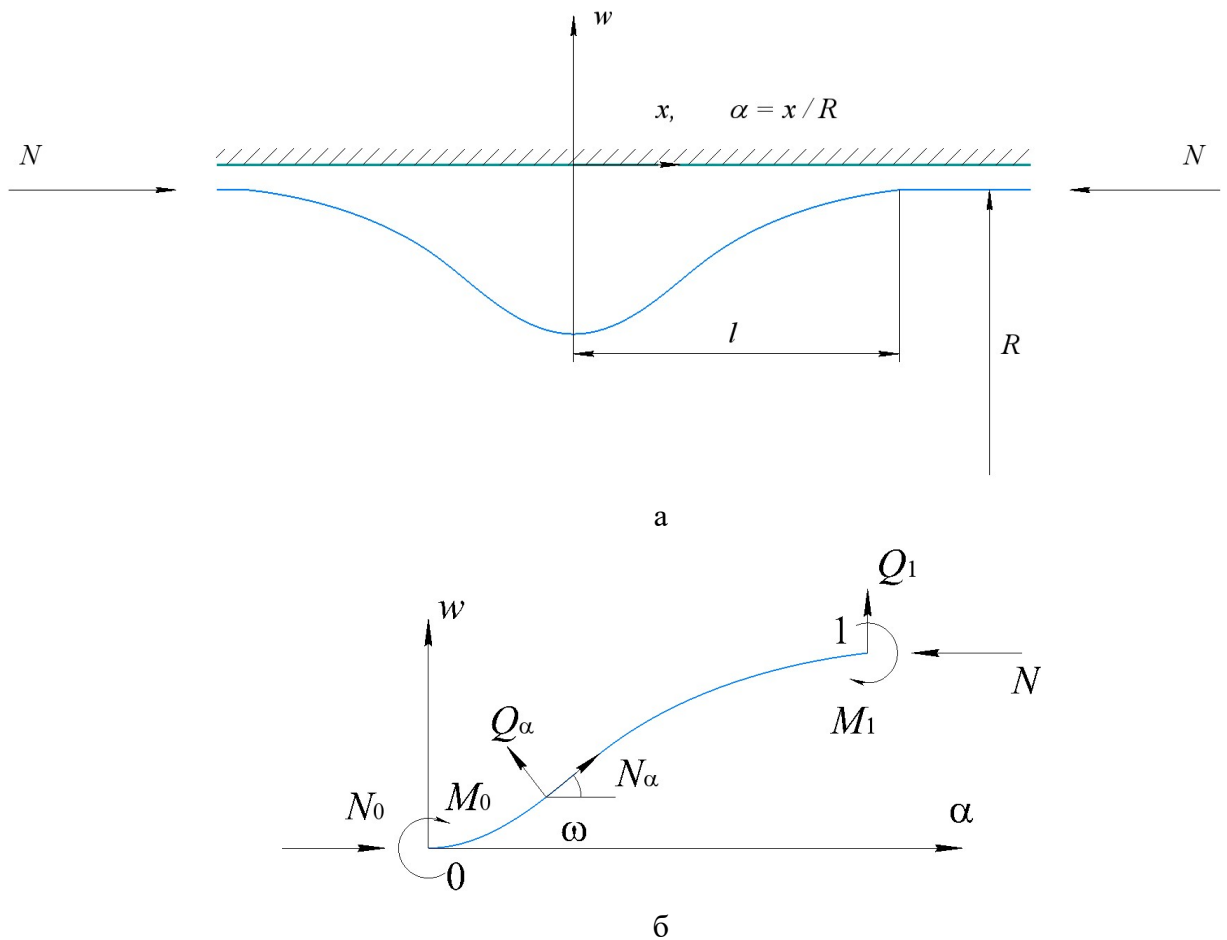


Рисунок 16 – Форма потери устойчивости лейнера композитного бака при действии осевой сжимающей силы (а), силы и перемещения на рассматриваемом участке лейнера (б)

В четвёртой Главе определён коэффициент теплопроводности стенки бака. При помощи введённого в работе эффективного коэффициента теплопроводности

стенки бака  $\lambda_{эф} = H/\Delta$ , где  $\Delta = \frac{h_2}{\lambda_{2t}} + \frac{h}{\lambda_t} + \frac{h_1}{\lambda_{1t}}$ , определена температура на



наружной поверхности  $T^*$ . Условие теплопередачи на наружной поверхности бака имеет вид

$$q = \alpha (T_{\infty} - T^*).$$

Коэффициент теплопередачи выражается через критерии Нуссельта  $Nu$ , Грасгофа  $Gr$  и Прандтля  $Pr$ . Для случая свободной конвекции тонкостенного бака ( $H \ll R$ ), ориентированного внутрь холодной поверхностью в горячей среде, получим

$$\alpha = 0.15 \lambda_3 \sqrt{\frac{2(T_{\infty} - T^*)g}{a(T_{\infty} + T^*)\nu}}.$$

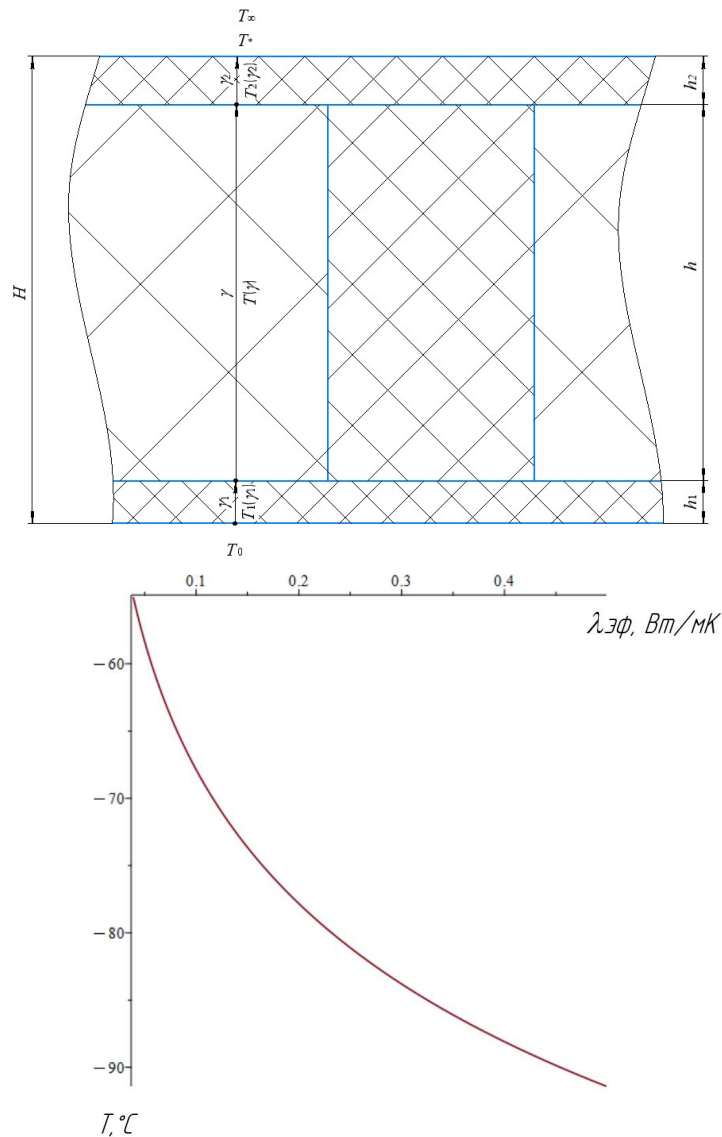
Уравнение, определяющее температуру на наружной поверхности бака, имеет вид

$$T^* = T_0 + 0.15 \sqrt{\frac{2(T_{\infty} - T^*)g}{a(T_{\infty} + T^*)\nu\lambda_{\text{эф}}}} (T_{\infty} - T^*)$$

и может быть решено графически или численно. Здесь  $T_0$  – температура на внутренней поверхности бака;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $a$  – коэффициенты теплопроводности, кинематической вязкости и температуропроводности окружающей среды. На Рисунке 17 показаны зоны температур в стенке бака (а) и зависимость температуры на наружной стенке бака от эффективного коэффициента теплопроводности. Для рассматриваемого в работе модельного бака получено значение эффективного коэффициента теплопроводности  $\lambda_{\text{эф}} = 0.132$ .

В пятой Главе представлен опыт изготовления модельного криогенного металлокомпозитного топливного бака, его испытаний и обсуждаются полученные экспериментальные результаты.

Изготовленный по разработанной технологии и проектным параметрам, полученным в Главе 2, модельный бак представлен на Рисунке 18. Вес 1 м<sup>2</sup> стенки модельного бака составил 14.59 кг. При изготовлении модельного бака были рассчитаны технологические параметры намотки и температурного отверждения бака, обсуждаемые в Главе 3.



а

б

Рисунок 17 – Зоны температуры в стенке бака (а), Зависимость температуры на внешней стенке бака от эффективного коэффициента теплопроводности стенки бака при захлаживании бака жидким азотом (б)

В результате испытаний модель металлокомпозитного криогенного топливного бака диаметром 1 м и длиной между фланцевыми соединениями 2 м выдержала 10 захлаживаний жидким азотом, а затем была разрушена осевой сжимающей эквивалентной силой 3.7 МН при давлении заправленного жидкого азота 0.5 МПа (Рисунок 19а). При этом разрушению подверглась только силовая оболочка, нарушения герметичности бака не произошло. Расчётная разрушающая нагрузка составляет 3.92 МН.



Рисунок 18 – Модельный металлокомпозитный криогенный топливный бак

В пятой Главе рассматриваются вопросы, связанные с использованием измерительных систем на основе оптоволоконных датчиков температуры и деформации, внедрённых в конструкцию и материал модельного бака, возникающие в процессе проведения испытаний и эксплуатации металлокомпозитного криогенного топливного бака в режиме реального времени. Проведённые испытания показали работоспособность имплементированных в материал конструкции волоконнооптических датчиков, измерения которых в режиме реального времени были подтверждены при помощи традиционных тензодатчиков и температурных датчиков, установленных на наружной поверхности бака перед проведением испытаний, а также при помощи тепловизионного оборудования (Рисунок 19б). Установлено, что существенной проблемой при использовании оптоволоконных датчиков в процессе эксплуатации металлокомпозитного криогенного топливного бака является широкий диапазон рабочих температур. Так как в процессе использования температура внутренней поверхности бака – лайнера – может меняться на величину до 216 К, а наружной поверхности до 60-80 К. В этом случае необходима корректировка информации с ВОД с учётом температуры. Корректировка с учётом температуры

(термокомпенсация) осуществляется посредством ВБР, рабочая часть которой была клеена в металлическую оболочку наружным диаметром 0.2 мм и длиной 12 мм, что позволяет изолировать ВБР от действия деформации.

Шестая Глава посвящена применению описанных выше методов проектирования и расчёта к полноразмерным конструкциям криогенных топливных баков перспективных ракет-носителей. В Главе 6 приведена комплексная модель оценки прочности металлокомпозитного криогенного топливного бака. Бак окислителя перспективной РН диаметром 4.1 м и длиной около 19.2 м был спроектирован по представленным в Главе 2 методикам и подходам. Для целей проектирования принимаются максимальные нагрузки на обечайку бака – его цилиндрическую часть: расчётное внутреннее давление  $p = 0,84$  МПа; расчётное осевое эквивалентное сжимающее усилие  $T_{экр} = 11\,390,24$  кН. В качестве рабочего тела предполагается использование кислорода или сжиженного природного газа. В Таблице 3 представлена весовая сводка спроектированного бака.

В таблице толщина лейнера, выполненного из алюминиевого сплава, составляет 1.0 мм, толщина силовой оболочки на лейнере 1.0 мм, толщина пенопласта и сетчатой структуры 27 мм, толщина наружной обшивки 0.25 мм. Вес днищ и шпангоутов не учитывается. Можно отметить, что вес применяемых в предлагаемой концепции металлических шпангоутов будет сопоставим или даже ниже, чем у используемых алюминиевых, в связи с тем, что внутри объёма шпангоута значительная часть металла замещена углепластиком со значительно более низкой плотностью материала. Проведено сравнение с баком вафельной конструкции из алюминиевого сплава аналогичных размеров на аналогичное силовое воздействие. Вес 1 м<sup>2</sup> стенки металлического вафельного бака составил 18.34 кг.

Результаты проектирования баков с диаметрами, приближенными к реальным диаметрам ступеней РН, показывают возможность снижения массы при использовании предлагаемой концепции до 34,0%. Этот результат, а также значительно более низкая трудоёмкость изготовления и более высокий

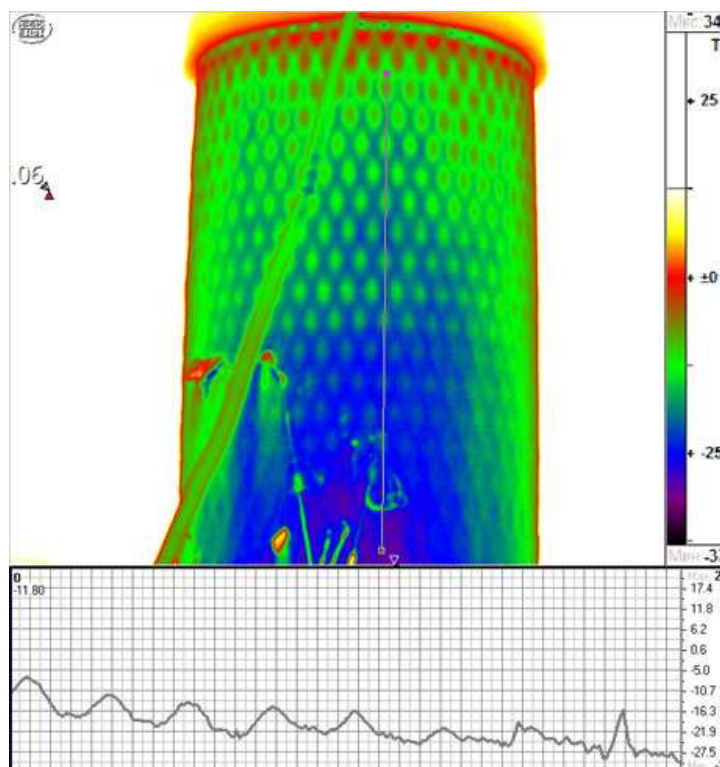
коэффициент использования материалов в металлокомпозитном баке, открывают широкие возможности эффективной реализации предлагаемой конструктивно-технологической концепции в ракетной технике.

Таблица 3 – Результаты проектирования полноразмерного бака.

Конструкция металлокомпозитного бака	Вес 1 м <sup>2</sup> стенки, кг
Металлический герметизирующий лейнер	2.68
Внутренний силовой композитный слой для восприятия давления	1.45
Сетчатый слой	7.33
Конструкционный пенопласт	0.89
Конструкционный криогенный клей	1.2
Наружная обшивка	0.36
Всего:	13.91



а



б

Рисунок 19 – Разрушение модельного бака в результате испытаний (а), тепловизионный контроль в процессе захлаживания бака (б)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Разработана новая конструктивно-технологическая концепция несущего металлокомпозитного криогенного топливного бака для ракетно-космической техники, решена комплексная проблема проектирования, расчёта, разработки технологии изготовления и экспериментальной отработки нового класса криогенных металлокомпозитных топливных баков ЛА.**

Основные новые научные результаты, полученные в диссертационной работе, состоят в следующем:

- 1 Повышена весовая эффективность крупногабаритных натуральных криогенных металлокомпозитных топливных баков на 30-35% по сравнению с вафельными отсеками из алюминиевых сплавов.
- 2 Впервые решена задача устойчивости цилиндрической оболочки при намотке гибкой системы нитей с натяжением. В рамках нелинейной теории оболочек найдено решение, определяющее критическую величину натяжения нитей, наматываемых на бесконечно длинную цилиндрическую оболочку, и критическое напряжение, определяющее потерю устойчивости лайнера при намотке композитного слоя. Получено универсальное выражение для критического натяжения, зависящего от радиуса, изгибной жёсткости оболочки и параметра  $\lambda_{cr}^2$ , расчётное значение которого составляет величину 732. Полученное решение подтверждено экспериментально на модельных оболочках из алюминия, стали и термопласта и установлено, что экспериментальное значение параметра  $\lambda_{cr}^2$  отличается от расчётного значения на 1.2%.
- 3 Решена на основе нелинейных уравнений теории оболочек задача устойчивости тонкостенного лайнера, заключённого в композитный силовой слой при температурной обработке. Установлено, что критическая деформация оболочки может быть аппроксимирована соотношением  $\varepsilon_{cr} = C(h/R)^{1.2}$ , в котором  $C = 0.73$ .
- 4 Впервые решена задача устойчивости лайнера бака, находящегося в жёсткой среде, от действия осевой сжимающей силы. При помощи уравнений

нелинейной теории цилиндрических оболочек и метода Бубнова-Галёркина получено приближённое решение, определяющее предельную величину докритической деформации лайнера бака, находящегося в жёсткой среде, от действия осевой сжимающей силы.

- 5 Решена задача о взаимодействии сетчатой оболочки с наружными обшивками и металлическим лайнером, учитывающая деформируемость сетчатой оболочки по толщине. Разработана модель силовой стенки бака, позволяющая вычислить коэффициенты жёсткости и теплопроводности стенки бака, деформации и прогибы функциональных слоёв стенки бака. Разработана методика расчёта теплофизических свойств стенки бака в радиальном направлении, позволяющая оценить теплозащитные свойства бака, без использования дополнительных теплоизоляционных материалов. Представлено универсальное уравнение, определяющее температуру на наружной поверхности стенки бака.
- 6 Разработана комплексная модель оценки прочности конструкции металлокомпозитного криогенного топливного бака, работоспособная на всех этапах жизненного цикла изделия, при проектировании, изготовлении, испытаниях и эксплуатации.
- 7 На основе теоретических исследований и разработанных моделей исследовано контактное взаимодействие между функциональными слоями силовой стенки металлокомпозитного криогенного бака интегральной конструкции, которое может привести к отслоению металлического лайнера при действии криогенных температур.
- 8 На основании теоретических исследований и решённых задач исследовано влияние подкрепляющего шпангоута на контактные силы, возникающие в металлическом лайнере и установлена следующая закономерность: контактные силы, приводящие к отслаиванию лайнера и нарушению целостности конструкции при действии криогенных температур, значительно возрастают в зоне размещения шпангоута. Разработан конструктивный вариант шпангоута с управляемыми коэффициентом линейного температурного расширения и жёсткостью для компенсации возникающих контактных сил.

- 9 Разработана новая конструктивно-технологическая концепция криогенного металлокомпозитного топливного бака с несущей оболочкой, совмещающая в интегральной конструкции металлокомпозитный баллон давления и силовую сетчатую оболочку.
- 10 Предложен метод оптимального проектирования металлокомпозитного криогенного топливного бака с несущей оболочкой. Разработанное в работе ПО позволяет сократить время проектирования бака до нескольких минут.
- 11 Разработана и апробирована на модельном баке технология изготовления криогенных металлокомпозитных топливных баков. Установлено, что трудоёмкость изготовления металлокомпозитного бака ниже до 50%, а коэффициент использования материалов на порядок превосходит аналогичные величины при изготовлении баков из металлических сплавов.
- 12 Разработан метод подтверждения напряжённо-деформированного и температурного состояния конструкции бака при помощи внедрённой в материал и конструкцию измерительной системы на основе волоконно-оптических датчиков. Исследованы вопросы защиты выводов измерительных систем в процессе изготовления конструкции и вопросы получения измерений в процессе эксплуатации и испытаний в режиме реального времени. Установлено, что разработанная технология размещения датчиков позволяет сохранить их работоспособными и без повреждений при термообработке и механической обработке.
- 13 На основе полученных решений создано программное обеспечение для расчёта технологических параметров изготовления металлокомпозитных криогенных топливных баков, позволяющее сократить время проведения расчётов технологических параметров изготовления до нескольких минут.
- 14 На основе полученных результатов осуществлено проектирование, изготовление и экспериментальная отработка модельного криогенного металлокомпозитного топливного бака.
- 15 Результаты работы использованы при проектировании и расчёте баллонов и баков давления на двух предприятиях России.



16 На основании выполненных исследований решена научная проблема, вносящая значительный вклад в развитие космической техники – создана новая энергоэффективная конструктивно-технологическая концепция высокопрочного криогенного топливного бака на основе металлокомпозитных ёмкостей и силовых сетчатых структур, повышающая экономичность изделий ракетно-космической техники.

### **ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ**

Исследования технологических вопросов серийного изготовления крупногабаритных криогенных топливных баков с использованием полимерных композитных материалов и металлического лайнера.

Исследования возможности создания композитных криогенных топливных баков с несущей сетчатой стенкой и изотропным полимерным лайнером – для проектирования, расчёта технологических и эксплуатационных режимов изготовления и работы баков с полимерным лайнером пригодны полученные в работе соотношения и методики, в результате успеха может быть получена ещё более эффективная конструкция в весовом и экономических планах.

### **Основные результаты диссертации отражены в работах:**

- 1 Склезнев А.А., Васильев В.В. Продольные и изгибные колебания сетчатого композитного переходного отсека космического аппарата // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2009. – №2, т. 15. – С. 242-256
- 2 Склезнев А.А. Прикладной метод определения собственных частот колебаний сетчатых композитных конструкций космических аппаратов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2010. – №2, т. 16. – С. 241-251
- 3 Склезнев А.А., Васильев В.В. Влияние осевой силы на частоту продольных колебаний сетчатого композитного переходного отсека космического аппарата // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2012. – №1, т. 18. – С. 57-63
- 4 Склезнев А.А., Разин А.Ф. Бетонные конструкции с сетчатой композитной арматурой // Композиты и наноструктуры. – 2015. – №3 (27), т. 7. – С. 145-150

- 5 Склезнев А.А., Мироненко Е.Д., Бабичев А.А. К вопросу обеспечения оптимального натяжения вант композитного бака высокого давления космического аппарата // Вестник «НПО имени С.А. Лавочкина». – 2019. – №1/43. – С. 66-70
- 6 Склезнев А.А., Бабичев А.А., Васильев В.В., Разин А.Ф., Шаныгин А.Н., Фомин Д.Ю., Марескин И.В. Сопротивление композитных сетчатых конструкций ударному повреждению // Конструкции из композиционных материалов – межотраслевой научно-технический журнал. – 2021. – №3 (163). – С. 3-6
- 7 Склезнев А.А., Бабичев А.А. К вопросу расчёта жёсткостных характеристик сетчатых композитных конструкций с металлическими обшивками // Вестник Московского авиационного института. – 2022. – № 2, т. 29. – С. 220–227
- 8 Склезнев А.А., Васильев В.В. Устойчивость лейнера цилиндрического композитного баллона давления // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2022. – № 2, т. 28. – С. 235–246
- 9 Склезнев А.А., Агапов И.Г., Червяков А.А. Решение задачи оптимизации в целях проектирования сетчатой структуры из полимерных композиционных материалов с наружной обшивкой // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2022. – № 4, т. 25. – С. 70–82
- 10 Склезнев А.А., Васильев В.В., Салов В.А. Устойчивость бесконечно длинной цилиндрической оболочки под действием наружного давления, создаваемого намоткой гибких нитей//Известия РАН. Механика твёрдого тела. – 2022. – №6. – С. 63–71
- 11 Склезнев А.А. Устойчивость лейнера цилиндрического металлокомпозитного бака при осевом сжатии // Конструкции из композиционных материалов – межотраслевой научно-технический журнал. – 2023. №2 (170). – С. 3-7
- 12 Склезнев А.А., Титов В.А., Юранев О.А., Разин А.Ф., Бабичев А.А., Пшеничников И.В., Бородулин Д.А. Проектирование и изготовление криогенных металлокомпозитных топливных баков // Конструкции из композиционных материалов – межотраслевой научно-технический журнал. – 2023. – №2(170). – С. 12-20

- 13 Skleznev A.A., Razin A.F., Babichev A.A. Arctic Building Material Reinforced by Composite Lattice Structure // Materials Science Forum. – 2019. – Vol.945. – P. 15-19
- 14 Skleznev A.A., Vasiliev V.V., Salov V.A. Stability of an Infinitely Long Cylindrical Shell Under the External Pressure Generated by Winding Flexible Threads // Mechanics of Solids. – 2022. – Vol. 57, Issue 6. – P. 1330–1337
- 15 Склезнев А.А. Программное обеспечение для проектирования цилиндрических и конических сетчатых композитных конструкций с учётом ограничений по частоте свободных колебаний // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015614055 Заявка 2015610871, 17.02.2015 Оpubл. 20.05.2015.
- 16 Склезнев А.А. Программное обеспечение для проектирования композитного сетчатого крыла самолёта // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015614050 Заявка 2015610870, 17.02.2015 Оpubл. 20.05.2015.
- 17 Склезнев А.А., Васильев В.В., Разин А.Ф. Композитобетонная колонна // Патент РФ на полезную модель №155801 МПК E04C 3/20 (2006.01) Заявка 2015124761/03, 24.06.2015 Оpubл. 20.10.2015 Бюл. № 29.
- 18 Склезнев А.А., Борисов В.Н., Бабичев А.А., Палкин А.Н. Адаптер для нескольких полезных нагрузок в виде сетчатой оболочки из полимерных композиционных материалов // Патент РФ на изобретение №2749468 МПК B64G 1/22 (2006.01) Заявка 2020141538, 15.12.2020 Оpubл. 11.06.2021 Бюл. № 17.
- 19 Склезнев А.А., Бабичев А.А. Программное обеспечение для расчёта максимальной силы натяжения раскладчика // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021662511 Заявка 2021660949, 08.07.2021 Оpubл. 30.07.2021
- 20 Склезнев А.А., Бабичев А.А. Программное обеспечение для расчёта минимального давления наддува лейнера заготовки композитного бака

- давления // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021662801 Заявка 2021660959, 06.07.2021 Оpubл. 05.08.2021
- 21 Склезнев А.А., Васильев В.В., Разин А.Ф., Салов В.А. Несущая сетчатая оболочка из композиционных материалов с металлической обшивкой и способ её изготовления // Патент РФ на изобретение №2765630 МПК В64С 1/22 (2006.01) Заявка 2020138744, 24.11.2020 Оpubл. 01.02.2022 Бюл. № 4
- 22 Склезнев А.А., Бабичев А.А., Кузьмин А.А., Слитков М.Н. Программное обеспечение для анализа температурного режима обработки габаритных изделий из армированных полимерных композиционных материалов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022617776 от 25.04.2022 Заявка 2022615243, 28.03.2022 Оpubл. 25.04.2022
- 23 Skleznev A.A., Vasiliev V.V., Razin A.F. Application of Lattice Composite Structures as Reinforcing Elements of Concrete Columns // ECCM 2016 - Proceeding of the 17th European Conference on Composite Materials, Munich, Deutschland, 26-30 June 2016: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85018619142>
- 24 Склезнев А.А. Проектирование композитного криогенного топливного бака с несущей сетчатой обечайкой // Сб. тр. 10<sup>й</sup> Всероссийской научной конф. «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» – г. Москва, 17-19 ноября 2020 г. // М.: ООО «Сам Полиграфист». – 2020 г. – С. 205-208
- 25 Склезнев А.А., Бабичев А.А., Борисов В.Н. Поликонический композитный сетчатый адаптер полезной нагрузки и технология его изготовления // Изв. Волгоградского государств. технического университета. – 2021. – №2(249). – С. 52-55
- 26 Склезнев А.А., Анискович В.А., Будадин О.Н., Козельская С.О., Кутюрин Ю.Г., Рыков А.Н., Гнусин П.И., Юранёв О.А. Интегрирование волоконно-оптических датчиков в композитный цилиндрический корпус из углепластика, изготовленный способом непрерывной намотки // Контроль. Диагностика. – 2022. – №2, т. 25. –С. 16–23

- 27 Склезнев А.А., Бабичев А.А., Разин А.Ф. Исследование взаимного влияния заготовки изделия из полимерного композиционного материала и технологической оправки друг на друга в процессе изготовления при температурной обработке // Южно-Сибирский научный вестник. – 2023. – № 1(47). – С. 56-60