

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

доктора технических наук Бурнышевой Татьяны Витальевны на диссертацию

Склезнева Андрея Анатольевича «Проектирование, конструкция и изготовление металлокомпозитных криогенных топливных баков для ракетно-космической техники», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности

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

### **1. Оценка объема и структуры работы**

Диссертация А.А. Склезнева на соискание ученой степени доктора технических наук состоит из введения, шести глав, заключения и общих выводов, списка литературы, включающего 200 наименований используемых публикаций отечественных и зарубежных авторов, и трех приложений. Основное содержание изложено на 322 страницах, включает 10 таблиц и 144 рисунка. Объем приложений 46 страниц.

### **2. Актуальность избранной темы**

Снижение массы конструкций космических летательных аппаратов в настоящее время возможно за счет применения современных легких материалов с высокими прочностными и жесткостными характеристиками, а также внедрения новых конструкторско-технологических решений.

Уменьшение массы изделия возможно за счет применения в конструкции несущих топливных баков космических носителей армированных полимерных композитных материалов.

В современных конструкциях летательных аппаратов используются сетчатые композитные оболочки как самостоятельный конструктивный элемент, либо совместно с обшивкой. Композиционный материал хорошо

работает на приложенную вдоль волокон нагрузку. Технология намотки волокна позволяет создавать конструкцию и композиционный материал одновременно.

Разработка и создание комбинированной конструкции несущих топливных баков перспективных космических носителей, включающей сетчатую композитную структуру с обшивкой и металлический лайнер, требует серьезной проработки, как конструкторского решения, так и технологии изготовления.

В обсуждаемой диссертации представлена новая конструктивно-технологической концепция несущего металлокомпозитного криогенного топливного бака. Представлено решение комплексной проблемы проектирования конструкций данного класса на основе технологического объединения структурных элементов криогенного топливного бака. Разработана комплексная модель оценки прочности конструкции металлокомпозитного криогенного топливного бака. Разработана новая технология изготовления, проведена экспериментальная отработка нового класса криогенных металлокомпозитных топливных баков летательных аппаратов.

Решение обозначенной выше проблемы позволяет в целом повысить весовую и экономическую эффективность космического летательного аппарата, снизить трудоемкость изготовления баков. Несомненно, решение данной проблемы определяет **актуальность** темы диссертации.

### **3. Соответствие содержания диссертационной работы заявленной специальности**

Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.5.13 «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов»:

- п. 1 «Разработка методов проектирования и конструирования, математического и программно-алгоритмического обеспечения для выбора оптимальных облика и параметров, компоновки и конструктивно-силовой схемы, агрегатов и систем ЛА, наземных комплексов и стартового оборудования, с учетом особенностей технологии изготовления, отработки и испытаний, механического и теплового нагружения, взаимосвязи ЛА с наземным комплексом и стартовым оборудованием, неопределенности проектных решений. Разработка методов и алгоритмов обеспечения контроля и обеспечения эффективности применения ЛА в процессе эксплуатации»
- п. 2 «Создание теоретической, методической, экспериментальной и производственной базы, позволяющих обеспечить требуемые показатели качества по назначению, надежности, точности, взаимозаменяемости, технологичности, унификации и стандартизации, эргономичности, технической эстетики, патентной чистоты»
- п. 4 «Исследование влияния на технические характеристики систем и конструктивное выполнение корпуса ЛА газо- и гидродинамических процессов в проектируемых конструкциях»

#### **4. Степень разработанности темы, обоснованность научных положений и рекомендаций**

На основе проведенного критического анализа проблемы создания новых энергоэффективных высокопрочных криогенных топливных баков на основе металлокомпозитных ёмкостей и силовых сетчатых структур, повышающих экономичность изделий ракетно-космической техники, определено отсутствие на данный момент времени научно обоснованных технических и технологических решений.

Поэтому в диссертации выполнено комплексное исследование с целью 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 этого построены расчётные соотношения для оценки поведения функциональных слоёв стенки металлокомпозитного криогенного бака в широком диапазоне эксплуатационных температур и силового нагружения, получены расчётные соотношения для определения технологических параметров изготовления и эксплуатационных параметров металлокомпозитных криогенных топливных баков с учётом сохранения устойчивости и прочности тонкостенного металлического лайнера, разработана новая производственная технология изготовления данного класса конструкций, а также разработана производственная технология внедрения измерительных систем на основе волоконно-оптических датчиков в материал и конструкцию, разработано программное обеспечение для расчёта технологических параметров изготовления металлокомпозитных криогенных топливных баков.

Сформулированная в диссертации цель достигнута, поставленные в связи с этим задачи решены полностью. Научные положения и сформулированные выводы вполне обоснованы.

## **5. Новизна и достоверность полученных результатов**

Новые научные результаты, полученные в диссертации, заключаются в следующем

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.

2. Разработаны методы проектирования и теоретическая база с методическим 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<sup>7</sup> 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.

Достоверность результатов и разработанных методов проектирования, полученных соискателем проектных параметров металлокомпозитного криогенного топливного бака, выводов, сделанных в диссертации, обеспечивается корректным применением апробированных теоретических положений теории оболочек и механики композитов, прямым расчётом спроектированных конструкций методом конечных элементов и результатами экспериментального исследования модельных конструкций.

## **6. Теоретическая и практическая значимость диссертации**

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы заключаются 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.

Кроме того, результаты диссертации использовались в учебном процессе МАИ (НИУ).

## **7. Достоинства и недостатки по содержанию и оформлению диссертации и автореферата**

Оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям ГОСТ 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления». Автореферат диссертации в целом полностью отражает ее содержание. Список цитируемой в диссертации литературы из 200 наименований, в том числе 74 зарубежных публикаций, свидетельствует о глубоком изучении соискателем рассматриваемой проблемы.

Основные результаты диссертации изложены в 39 научных работах, при этом 12 статей опубликованы в журналах, включенных в Перечень

рецензируемых научных изданий рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ. Результаты диссертационной работы достаточно хорошо апробированы на Всероссийских и Международных научных конференциях.

К достоинствам диссертации следует отнести:

1) хорошую структурную проработку и представление материала диссертационного исследования;

2) подробный и глубокий анализ конструкций из композиционных материалов, применяемых в настоящее время в ракетно-космической технике, а также представленный российский и зарубежный опыт в области проектирования, расчёта и технологической отработки изготовления металлокомпозитных баков различного назначения;

3) ориентацию разработанной конечно-элементной модели бака, представляющую собой сложную структуру элементов из разнородных материалов, на использование стандартных пакетов прикладных программ;

4) тщательный анализ результатов расчетов НДС, а также деформирования бака при потере устойчивости от действия максимальных сжимающих усилий;

5) подробное описание новой разработанной технологии изготовления металлокомпозитных криогенных топливных баков, учитывающей сохранения формы отдельных элементов конструкции бака при различных технологических переходах;

6) подробное описание формирования, установки и использования системы волоконно-оптических датчиков на основе решеток Брэгга для регистрации динамики изменения деформаций на внутренней и наружной поверхностях силовой оболочки из углепластика и элементов конструкции бака в режиме реального времени;

7) апробирование предложенных конструкторских и технологических решений на модельной конструкции металлокомпозитного криогенного топливного бака.



К замечаниям по содержанию диссертации и автореферата относится следующее:

1. В представленных задачах оптимального проектирования конструкции топливного бака (п. 2.4.3) соискателем проводится расчет массы сетчатой структуры с учетом толщины спиральных и кольцевых ребер. Следовало учесть геометрические параметры шпангоутов, как отдельного вида структурных элементов конструкции.

2. Криогенные топливные баки представляют собой конструкцию с многоэлементной структурой из разных материалов. При этом представленная в диссертации технология изготовления направлена на изготовление цельной конструкции, а не разборной. Из диссертационной работы непонятно как в расчетной конечно-элементной модели задавалось совместное деформирование металлического лайнера и композитной сетчатой структуры.

3. В силовом наборе сетчатой структуры модельного бака спиральные и кольцевые ребра работают на сжатие и растяжение. Как осуществлялся выбор толщины обшивки реберной структуры для модельного бака с учетом планируемых нагрузок на сетку? Проводились ли численные расчеты?

Однако указанные замечания и недостатки принципиально не снижают научной и практической значимости диссертационной работы.

### **Заключение**

На основе критического анализа материалов диссертации и автореферата, а также замечаний, приведенных выше, можно сделать следующий вывод: диссертационная работа Склезнева Андрея Анатольевича «Проектирование, конструкция и изготовление металлокомпозитных криогенных топливных баков для ракетно-космической техники» является законченной научно-квалификационной работой, содержащей новые научно-обоснованные

конструкторско-технологические решения, внедрение которых внесет значительный вклад в развитие космической отрасли.

Диссертация «Проектирование, конструкция и изготовление металлокомпозитных криогенных топливных баков для ракетно-космической техники» соответствует требованиям пунктов 9, 10 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) в части, касающейся ученой степени доктора наук, а ее автор, Склезнев Андрей Анатольевич, достоин присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.13 «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов».

Заведующий кафедрой  
«Прочность летательных аппаратов»  
ФГБОУ ВО «Новосибирский  
государственный технический  
университет»,  
доктор технических наук

Бурнышева  
Татьяна Витальевна

15.09.2023г

Научная специальность: 05.07.03 – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

Подпись Бурнышевой Татьяны Витальевны заверяю:

*кач. Ок. КТМ*



алова

Почтовый адрес: Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20.

Раб. Тел.: 8(383)346-31-21

E-mail: burnysheva@corp.nstu.ru

*С. Склезнев*  
19.09.2023г.

*Склезнев А.А.*