

На правах рукописи



Хомовский Ярослав Николаевич

**ОЦЕНКА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ ПРЯМОТОЧНЫХ ВОЗДУШНО-
РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА РАННЕЙ СТАДИИ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Специальность 05.07.05

«Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный доктор технических наук, профессор
руководитель Демидов Анатолий Семёнович

Официальные Горбачёв Владимир Иванович, доктор физико-математических
оппоненты: наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», заведующий кафедрой

Арефьев Константин Юрьевич, кандидат технических наук, Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», начальник отдела

Ведущая Акционерное общество «Машиностроительное конструкторское
организация: бюро «Искра» имени Ивана Ивановича Картукова»

Защита состоится 21 декабря 2018 года в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», <https://mai.ru/upload/iblock/577/Dissertatsiya-KHomovskogo.pdf>

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета Д 212.125.08 доктор
технических наук, профессор



Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы

Во второй половине XX-го века и особенно в последние десятилетия в области авиационной и ракетной техники активно ведётся работа над созданием и совершенствованием прямоточных двигателей. Такие двигатели достаточно экономичны, относительно просты по конструкции, имеют высокие массовые характеристики и способны действовать на больших скоростях и высотах полёта по сравнению с ракетными и другими двигателями.

В настоящее время существует множество схем прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД). Их достоинства и недостатки можно рассматривать с различных позиций, например, с точки зрения газодинамических характеристик, надёжности, ресурса, стоимости и пр. Тема работы является актуальной во всех отношениях: тип двигателей; назначение и область их применения; обеспечение их прочностной надёжности.

Важным является сравнение двух типов схем ПВРД (подфюзеляжной и осесимметричной) с идентичной областью применения с точки зрения прочности (на начальных этапах проектирования), что, в конечном счёте, поможет выявить оптимальную в этом отношении конструкцию.

При этом следует учитывать аэродинамический нагрев летательного аппарата и особенности применения композитных материалов (КМ) при проектировании.

Цель и задачи диссертации

Целью работы является разработка методов прочностной оценки различных конструктивных схем на ранних этапах проектирования с учётом критериев прочности и особенностей конструкционных материалов.

Реализация цели включает решение следующих задач:

1. Разработать порядок расчётного анализа прочности конструкций подфюзеляжной и осесимметричной схем. Три этапа анализа: приближённые методы; МКЭ; выявление опасных мест.

2. Разработать критерии оценки НДС с учётом особенностей углерод-углеродных композитных материалов (УУКМ).

3. Рассмотреть контактную задачу теплообмена в УУКМ и выявить её связь с НДС.

4. Провести численные эксперименты по исследованию НДС конструкций; выявить влияние форм и размеров тонкостенных каналов на концентрацию напряжений в конструкции.

5. Доработать экспериментальную установку и провести исследования напряжённого состояния на моделях из оптически активного материала

6. Провести верификацию расчётных и экспериментальных данных

7. Разработать рекомендаций по проведению расчётов на прочность и выбору конструктивных схем двигателей на ранних этапах проектирования

Научная новизна исследования

В соответствии с поставленными в работе задачами, автором получены следующие научные результаты, обладающие научной новизной и выносимые на защиту:

1. Разработана методика, позволяющая определить и наилучшим образом совершенствовать наиболее опасные конструктивные элементы ДУ.

2. Разработаны критерии прочности, связанные с использованием УУКМ.

3. Предложен уточнённый способ решения теплоконтактной задачи в слоях УУКМ с учётом твёрдости поверхностного слоя углеродного волокна.

4. Предложен оптимальный вариант конструктивной схемы ДУ.

Предмет и объект исследований

Предмет исследований – расчётные и натуральные модели конструктивных схем и элементов ПВРД под воздействием температурных и механических нагрузок.

Объект исследований – конструктивные узлы подфюзеляжной и осесимметричной схем ПВРД.

Методология и методы исследования

Достижение поставленных целей осуществлялось путем расчетно-экспериментальных исследований. Расчеты выполнялись с помощью инженерных методик, новых и известных численных методов с использованием CAD/CAM-систем САПР типа SolidWorks и Ansys. Экспериментальная часть выполнялась с использованием метода оптического моделирования на поляризационно-проекционной установке.

Достоверность научных положений

Определяется корректностью поставленных задач, проведенными расчётными и экспериментальными исследованиями, удовлетворительной сходимостью результатов этих исследований.

Практическая ценность результатов

Теоретическая ценность результатов заключается в том, что: 1) предложена определённая последовательность проведения расчётов напряжённо-деформированного состояния (НДС) конструктивных схем; 2) предложенные критерии позволяют отдельно оценить влияние нагружения конструкции температурным градиентом и давлением; 3) предложен уточнённый способ решения теплоконтактной задачи в слоях УУКМ с учётом твёрдости поверхностного слоя углеродного волокна.

Практическая ценность результатов заключается в анализе прочности основных схем и выявлении перспективного направления для дальнейших исследований ПВРД, также даны рекомендации по проектированию ПВРД.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика совершенствования конструктивных элементов ПВРД путём определения напряжений с учётом коэффициентов концентрации напряжения.
2. Методика определения напряжений в структуре УУКМ с учётом теплообмена в волокнах.

3. Результаты экспериментальных исследований моделей элементов тракта прямоточного двигателя.

Личный вклад автора

Автор являлся инженером кафедры и ответственным экспериментатором представленных расчетно-экспериментальных исследований. Из публикаций в диссертацию включены также результаты, полученные автором самостоятельно и при его непосредственном соучастии со своими руководителями и коллегами. Содержание диссертации и автореферата обсуждено и согласовано со всеми соавторами.

Апробация работы

Достоверность работы обеспечена применением для расчётов программных комплексов, зарекомендовавших себя и сертифицированных для решения подобного рода задач.

Результаты работы по мере их получения были доложены на 3-х Международных конференциях «Авиация и космонавтика» (Москва 2013, 2014, 2016).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, из них 3 – в рецензируемых научных изданиях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы из 80 наименований, содержит 61 рисунок, 18 таблиц. Общий объем работы 96 страниц, включая рисунки и таблицы.

В первой главе приведен обзор отечественной и зарубежной литературы по развитию прямоточных технологий. Представлен анализ развития сверхзвуковых технологий, которые напрямую связаны с военно-техническим прогрессом. Рассмотрены основные конструктивные схемы, применяемые для прямоточных воздушно-реактивных двигателей

В первой части приведен анализ развития двигателей, способных летать на сверхзвуковых скоростях полёта. Выделены основные этапы перехода к использованию прямоточных воздушно-реактивных двигателей в качестве маршевых ступеней летательных аппаратов. Обозначены преимущества данных типов двигателей в сравнении с другими. Выделены особенности сверхзвуковых двигателей и их потенциальные преимущества. Основной проблемой, с которыми приходится сталкиваться при разработке данного типа двигателей, является надёжность силовой установки и, в частности, разрушение, связанное с аэродинамическим нагревом летательного аппарата.

Замечено, что первоначально двигательные установки были выполнены в основном по осесимметричным схемам. Постепенно появлялась тенденция использования коробчатых форм. Это может быть обусловлено тем, что в ряде случаев они лучше komponуются с летательными аппаратами.

Далее рассмотрены принципиальные схемы существующих прямоточных воздушно-реактивных двигателей. Их основные схемы, параметры, характеристики и области применения были рассмотрены в работах Сабельникова В.А., Артемова О.А., Александрова О.А., Яновского Л.С. и др.

В результате анализа литературных источников показано, что все существующие схемы условно можно разделить на два типа: осесимметричные и подфюзеляжные. Особое внимание уделено американской гиперзвуковой ракете Х-51, конструктивной особенностью которой является интеграция подфюзеляжного и осесимметричного вариантов в единой двигательной установке.

Было отмечено, что при проектировании силовых конструкций на ранней стадии проектирования главными задачами являются: выбор конструктивной схемы и определение параметров конструктивных элементов.

Особое внимание уделялось методологии расчёта конструктивных схем. При анализе напряжённо-деформированного состояния коробчатых (подфюзеляжных) схем могут применяться аппарат расчёта неразрезных пластин,

который принадлежит К.К. Лихареву и другие приближённые методы. В то же время они не учитывают все особенности конструктивных узлов. Применение метода конечных элементов позволяет учесть особенности геометрических форм оболочек коробчатого сечения и уточнить максимальные напряжения на стыке пластин. В отношении осесимметричных оболочек двухъярусного типа применение МКЭ позволяет выявить места концентраций напряжений на стыках пилонов с оболочками.

Важно отметить, что рассмотренные схемы не были проверены экспериментально и не имеют чёткой методологии. Поэтому одной из основных задач настоящей работы было проведение экспериментов, расчётно-теоретических исследований и анализ полученных результатов.

Во второй главе приводится постановка задачи исследования и рассматриваются основные проблемы прочности конструктивных схем и узлов.

Объектами исследования являются две конструктивные схемы прямооточных воздушно-реактивных двигателей, показанные на рисунке 1. Представленные габариты условных схем близки к реальным.

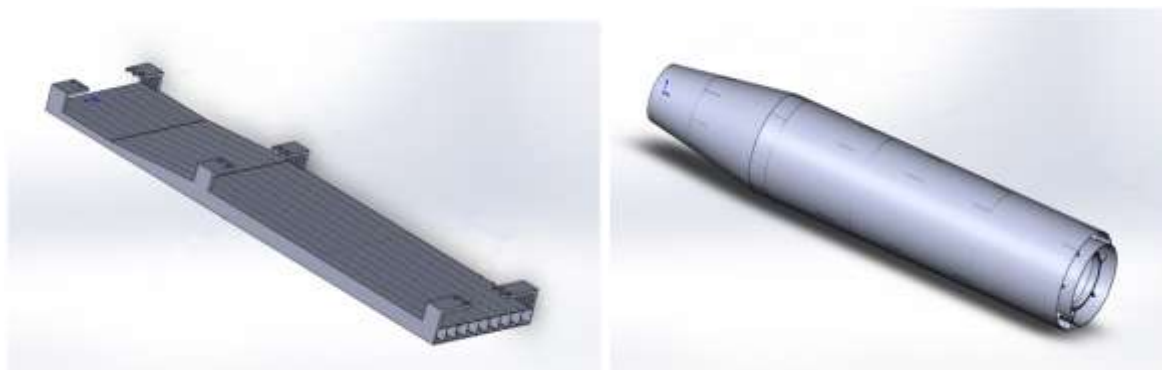


Рисунок 1. Подфюзеляжная и осесимметричная схемы прямооточных двигателей.

Проточный тракт подфюзеляжной схемы представляет собой ряд каналов, имеющих прямоугольное сечение и разделённых друг с другом продольными стойками. Количество каналов может изменяться на протяжении длины тракта двигателя. В рассматриваемом случае это 9 каналов с толщиной стенки 5 мм.

Проточный тракт осесимметричной схемы представляет собой пространство между двумя цилиндрическими оболочками, соединённые между собой несколькими рядами пилонов, толщины оболочек были приняты также 5 мм.

Для оптимизирования данных схем на ранних этапах проектирования разработан следующий алгоритм действий:

1. Выбор материала конструкции.
2. Идентификация ключевых параметров (действующих давлений и градиентов температур). Обоснование возможности рассмотрения каждого процесса изолированно.
3. Декомпозиция конструкции. Проектировочные расчёты на прочность элементов конструкции. Используются в виде объектов исследования балки (пластинки, оболочки) единичной ширины и применяются к ним соответствующие формулы расчётов.
4. Расчёты с помощью САЕ-систем инженерного анализа (SolidWorks Simulation);
5. В связи с типом использованных конструктивных материалов (УУКМ) формируются критерии прочности. Использование полученных критериев в расчётах;
6. На основе проведённых исследований выявляются «опасные» с точки зрения напряжённо-деформированного состояния элементы, их локальная оптимизация (конструктивная или путём замены материала), интегрирование в конструкцию и проведение повторных расчётов.
7. Возможная интеграция двух вариантов в один.

Отмечается, что при проектировании ЛА немаловажным является выбор материалов, из которых изготовлены основные элементы ДУ. В основе выбора материалов для производства элементов конструкции ДУ лежит принцип удовлетворения требований, обусловленных влиянием совокупности действующих нагрузок – тепловых, механических, аэродинамических и других.

В качестве материала конструкций для первой итерации решения был выбран композитный материал, т.к. появление композитных материалов (КМ) обусловлено созданием конструкций, работающих в условиях высокотемпературного нагрева и повышенных механических нагрузок. Также в конструкции возникают температурные перепады, существенно превышающие значения предельных разностей температур для металлов, что решается применением углерод-углеродных композиционных материалов, обладающих высокотермостойкой матрицей. При этом они обладают рядом особенностей, которые должны быть отражены в методах расчёта деталей, изготовленных из них.

К таким особенностям следует отнести:

- 1) существенную анизотропию свойств;
- 2) низкий коэффициент Пуассона;
- 3) низкий, а в определённом температурном диапазоне даже отрицательный коэффициент линейного расширения.

В связи с анизотропией свойств УУКМ и недостаточных данных, при проведении практических расчетов на прочность, приходится решать, какой из известных теорий прочности следует отдать предпочтение.

В третьей главе приведены результаты расчетов напряжённо-деформированного состояния основных конструктивных элементов двигательной установки.

Исследовалось влияние двух основных факторов, оказывающих на параметры прочности ключевое воздействие: статического давления воздуха внутри исследуемой проточной части и температурных градиентов.

Сначала рассматривались расчёты приближёнными методами по формулам теории пластин и оболочек. Проведён расчёт одного элемента воздухозаборного устройства. Определялись изгибные напряжения двигательной установки с помощью уравнения трёх моментов.

Общим недостатком аналитических методов оптимизации является то, что практически невозможно решить многокритериальную задачу, содержащую большое число переменных проектирования. С помощью этих методов можно найти оптимальное решение для отдельных элементов конструкции, имеющих достаточно простую геометрическую форму: балки, стержни, осесимметричные тела и др. Если необходимо провести оптимизацию сложных конструкций, состоящих из большого числа взаимосвязанных элементов, то целесообразно применять численные методы, алгоритмы которых просто представить в виде компьютерных программ. Поэтому далее проводились аналогичные расчёты в программе SolidWorks Simulation, в которой использовался критерий Мизеса, где многоосное напряжённое состояние заменяется эквивалентным одноосным.

В этой программе есть возможность задавать анизотропность только простым элементам, таким как прямоугольный брус, где различные свойства направлены вдоль соответственных осей. Задавать анизотропию сложных пространственных конструкций, или даже конструкций, расположенных под углом к главным осям, не представляется возможным. Поэтому для расчёта конструкции из используемого анизотропного материала было принято следующее допущение – для всех значений прочности и модулей упругости использовались соответственные усреднённые значения по основе и по утку. Это допущение соответствует технологии намотки, когда углеродные нити расположены под углом $\alpha=45^\circ$ к оси коробчатой оболочки (рис. 2); при этом прочность вдоль оси и в поперечном (окружном) направлении оказываются примерно одинаковыми. Данное упрощение является позволительным лишь на ранней стадии проектирования.

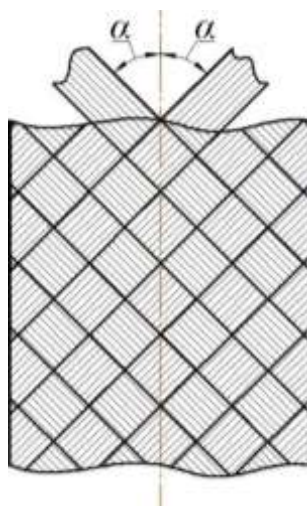


Рисунок 2. Схема расположения углеродных нитей

Расчёты с помощью пакета SolidWorks подтверждают расчёты, полученные приближённым способом, поэтому в дальнейшем используются лишь расчёты в программе SolidWorks. Различие в результатах объясняется тем, что в последнем случае учитывалась концентрация напряжений в местах крепления.

Также из сравнения картин НДС, полученных приближёнными методами и методами конечных элементов, следует, что в некоторых случаях при суммарном воздействии давления и температуры имеет место частичная компенсация напряжений.

Сравнивая расчёты по приближенным формулам теории пластин и оболочек первого участка воздухозаборного устройства (ВЗУ) и расчёты всего ВЗУ в программе SolidWorks Simulation можно сделать выводы о взаимном влиянии элементов конструкции и необходимости правильного выбора декомпозиции.

Расчёты напряжённо-деформированного состояния камер сгорания (КС) также выполнялись для двух схем. Конструктивная прочность КС оценивалась в составе системы «Изолятор + Камера сгорания». Изолятором называется участок между воздухозаборным устройством и КС, в котором тормозится набегающий поток, а также блокируются движения обратных потоков.

Исследование напряжённо-деформированного состояния подфюзеляжной схемы методами конечных элементов выявило ряд опасных мест: боковые стенки крайних каналов и места в углах коробчатого сечения.

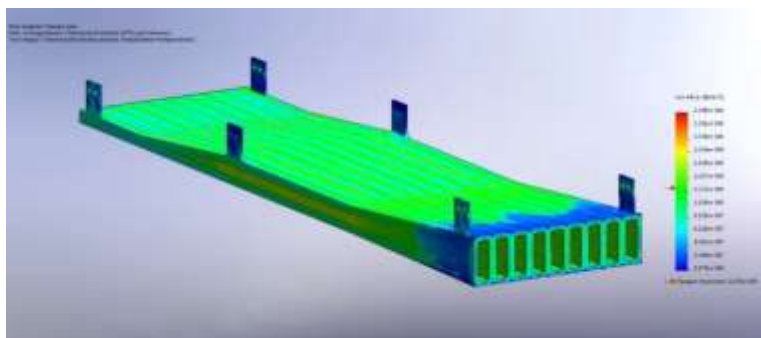


Рисунок 3. Эпюра эквивалентного напряжения по Мизесу подфюзеляжного варианта

Аналогичными методами исследовалось напряжённо-деформированное состояния осесимметричной схемы (рисунок 3).

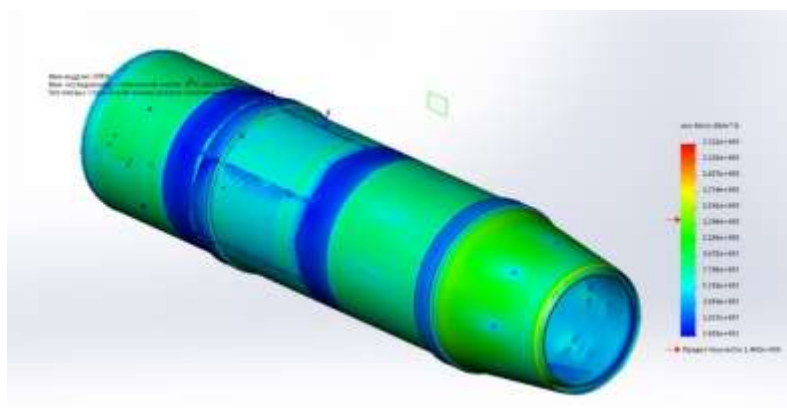


Рисунок 4. Эпюра эквивалентного напряжения по Мизесу осесимметричного варианта

Рассматривая осесимметричный вариант с идентичной толщиной можно сказать, что в области камеры сгорания возникают намного меньшие напряжения.

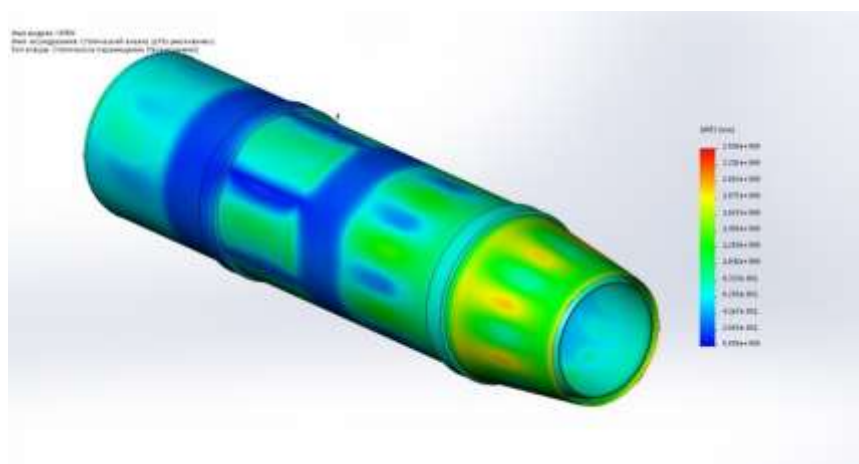


Рисунок 5. Эпюра перемещения

При этом получились достаточно большие перемещения на кромках, где садятся скачки уплотнения; их величина от суммарного воздействия давления и температур составляет 2, 5 мм и является опасной для данной толщины стенки.

Далее в главе представлен комплекс новых критериев, позволяющих проводить сравнение прямоточных двигателей осесимметричной и подфюзеляжной схем с точки зрения напряженно-деформированного состояния.

Вследствие существенного отличия в определяющих факторах возникновения температурных и силовых напряжений (в первом случае – величины модуля Юнга и коэффициента линейного расширения, во втором – размеры и формы конструктивных элементов) для совершенствования конструкции предлагалось рассмотреть два различных критерия: температурный K_T и силовой K_C .

K_T (.) представляет собой отношение максимального температурного напряжения на поверхности детали из исследуемого материала к максимальному температурному напряжению на поверхности такой же воображаемой детали из эталонного материала, при зафиксированной температуре одной из поверхностей. В скобках указываются названия исследуемого материала и эталонного (условного). Критерий K_T (.) характеризует совершенство конструкции с точки зрения выбора материала с целью минимизации температурных напряжений.

При использовании силового критерия K_C используется другой подход. Это может быть величина максимального коэффициента концентрации напряжения в рассматриваемом конструктивном узле или в его элементе. Фактически K_C представляет собой отношение максимального напряжения в конструктивном элементе к напряжению в ближайшей зоне.

Далее в главе сравниваются две схемы с учётом разработанных критериев. В таблицах ниже приведены значения критериев и запасы прочности для обеих схем.

Таблица 1 – Подфюзеляжный вариант

Участки ПВРД	Участки схемы	Тип критерия	Значения критериев	Запас прочности	Максимальные перемещения, мм. (приращение радиуса оболочки)
Камера дожига-ния	4*	K_T (УУКМ/ниобий)	$1,8 \cdot 10^7 / 38 \cdot 10^7 = 0,047$	1,4	0,92%
	1*	K_c (УУКМ)	$6 \cdot 10^7 / 2,5 \cdot 10^7 = 2,4$	2,3	0,55%
	2*	K_c (УУМ)	$12,7 \cdot 10^7 / 5,8 \cdot 10^7 = 2,2$	2,15	1,12%
	3*	K_c (УУКМ)	$9 \cdot 10^7 / 4 \cdot 10^7 = 2,25$	1,2	0,88%

Таблица 2 – Осесимметричный вариант

Участки ПВРД	Участки схемы	Тип критерия	Значения критериев	Запасы прочности	Максимальные перемещения, мм. приращение радиуса оболочки
Камера дожига-ния	3*	K_T (УУКМ/ниобий)	$7,7 \cdot 10^7 / 150 \cdot 10^7 = 0,05$	3,6	1,9%
	1*	K_c (УУКМ)	$1,2 \cdot 10^8 / 10^8 = 1,2$	1,1	3,2%
	2*	K_c (УУКМ)	$14 \cdot 10^7 / 10 \cdot 10^7 = 1,4$	2,4	2,2%
	3*	K_c (УУКМ)	$7 \cdot 10^7 / 6 \cdot 10^7 = 1,17$	2,6	1,9%
	4*	K_c (УУКМ)	$2,5 \cdot 10^7 / 2,2 \cdot 10^7 = 1,14$	2,5	0,9%

Анализируя вышеуказанные таблицы и значения критериев можно сделать следующие выводы:

- если значения критерия K_c меньше единицы, то это говорит о том, что оптимизировать конструкцию путём смены материала на эталонный не имеет смысла;
- если значения критерия K_c в подфюзеляжной конструкции больше 2, то это указывает на наличие концентраторов напряжения, влияние которых можно снизить за счёт увеличения радиусов скругления или введения дополнительных рёбер жёсткости (конструктивными методами).
- запасы прочности в подфюзеляжной схеме оказались ниже, чем в осесимметричной, что является ожидаемым. Также следует обратить внимание на 1 участок одной и другой схем, где заданная толщина обеспечивает более высокий запас прочности.

Результаты расчета позволили выявить качественную и количественную взаимосвязь диаметров волокон, размеров контактных пятен и контактных сил (рис. 6). При использовании углерод-углеродных композитных материалов, обладающих пониженной теплопроводностью, возможно за счёт технологии намотки влиять на контактный теплообмен и опосредованно на напряжения.

Эти результаты могут быть использованы при выборе размеров углеродных волокон для оболочек ракетных двигателей.

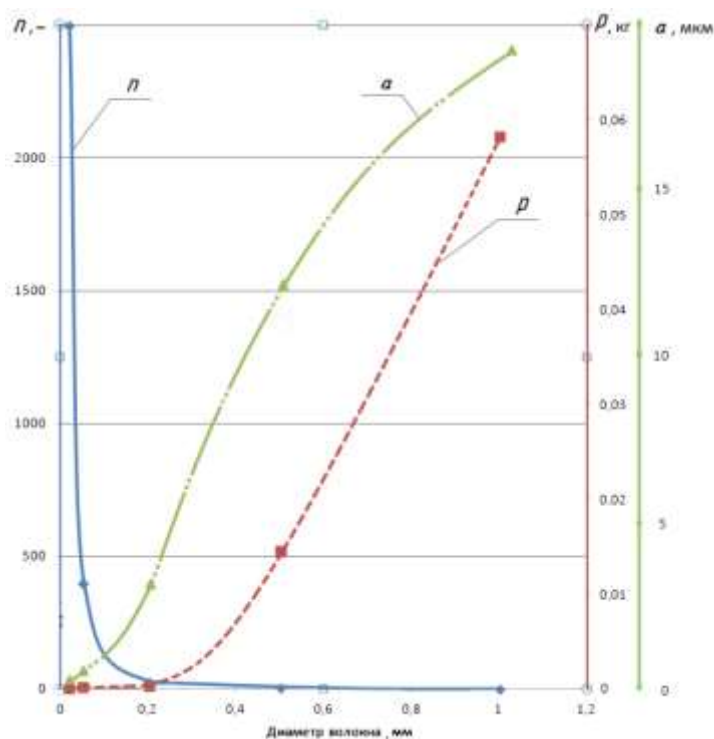


Рисунок 6. Зависимость расчетных характеристик (коэффициента κ , радиуса a пятна контакта в среднем слое, силы P в среднем слое) и числа n точек контакта на выделенной площадке от диаметра волокон

Далее в главе приведено сравнение расчётов прогибов балок из изотропного и анизотропного материалов. Была выявлена соответствующая погрешность расчётов.

В четвертой главе представлено расчётно-экспериментальное исследование напряжённого состояния моделей, соответствующих сечениям продольного тракта изолятора.

Основываясь на расчётах третьей главы, можно сделать вывод, что переход от прямоугольных сечений на входе в изолятор к круглым на входе в камеру сгорания существенно повысит общую прочность данного конструктивного элемента и сведёт к минимуму риск его разрушения под действием внутренних статических и динамических нагрузок. Обоснованность данного подхода реализована в ракете X-51.

В моделировании рассматривался данный переход (т.е. от прямоугольного к круглому каналу) с точки зрения увеличения радиуса в углах коробчатого канала.

При этом силовая и температурная задачи рассматривались отдельно. Выявлялись напряжения и коэффициенты концентрации напряжений в углах.



Рисунок 7. Виды моделей для термоиспытаний

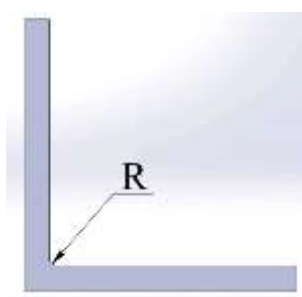


Рисунок 8. Модели для силовых испытаний; $R=0,1;1;2;3;4$ мм

Для моделей на рисунке 7 были заданы идентичные граничные условия: перепад температур в 50°C (повышенная температура внутри моделей) и давление 1 атм. на внутреннюю стенку для моделей на рисунке 8. Рассматривалось влияние радиуса в углах моделей на коэффициент концентрации напряжения в точке А по

отношению к напряжению в центральной части боковых граней (точка Б) как для одного типа моделей, так и для другого.

Таблица 3 – Температурная задача

R, мм	σ_x (т.А)	σ_y (т.А)	Результитрующее	σ_x (т.Б)	σ_y (т.Б)	Результитрующее	K_k
1	$-1,89 \cdot 10^6$	$-1,89 \cdot 10^6$	$2,67 \cdot 10^6$	$-0,9 \cdot 10^6$	$-1,45 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^6$	1,57
3	$-1,43 \cdot 10^6$	$-1,43 \cdot 10^6$	$2,02 \cdot 10^6$	$-0,87 \cdot 10^6$	$-1,09 \cdot 10^6$	$1,39 \cdot 10^6$	1,45
5	$-1,2 \cdot 10^6$	$-1,2 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^6$	$-0,84 \cdot 10^6$	$-0,86 \cdot 10^6$	$1,22 \cdot 10^6$	1,41
13	$-0,75 \cdot 10^6$	$-0,75 \cdot 10^6$	$1,06 \cdot 10^6$	$-0,63 \cdot 10^6$	$-0,46 \cdot 10^6$	$0,77 \cdot 10^6$	1,36
21	$-0,46 \cdot 10^6$	$-0,46 \cdot 10^6$	$0,65 \cdot 10^6$	$-0,4 \cdot 10^6$	$-0,33 \cdot 10^6$	$0,52 \cdot 10^6$	1,25
28,5	$-0,39 \cdot 10^6$	$-0,39 \cdot 10^6$	$0,55 \cdot 10^6$	$-0,39 \cdot 10^6$	$-0,25 \cdot 10^6$	$0,46 \cdot 10^6$	1,19

Таблица 4 – Силовая задача

	σ_x (т.А)	σ_y (т.А)	Результитрующее	σ_x (т.Б)	σ_y (т.Б)	Результитрующее	K_k
R=0,1мм	$10 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^6$	$14,1 \cdot 10^6$	$-3,3 \cdot 10^6$	$-0,1 \cdot 10^6$	$-3,3 \cdot 10^6$	4,28
R=1мм	$7,4 \cdot 10^6$	$7,4 \cdot 10^6$	$10,4 \cdot 10^6$	$-3,2 \cdot 10^6$	$-0,1 \cdot 10^6$	$-3,2 \cdot 10^6$	3,27
R=2мм	$6,2 \cdot 10^6$	$6,2 \cdot 10^6$	$8,77 \cdot 10^6$	$-2,9 \cdot 10^6$	$-0,1 \cdot 10^6$	$-2,9 \cdot 10^6$	3,02
R=3мм	$5,5 \cdot 10^6$	$5,5 \cdot 10^6$	$7,78 \cdot 10^6$	$-2,7 \cdot 10^6$	$-0,1 \cdot 10^6$	$-2,7 \cdot 10^6$	2,88

Анализируя таблицы 3 и 4, можно сделать выводы, что напряжения, возникающие от воздействия давления, существенно зависят от внутреннего радиуса, а напряжения от градиента температур зависят слабо. Это ещё раз подтверждает целесообразность отдельного рассмотрения этих факторов. Раздельная оценка коэффициентов концентрации напряжений по осям x и y может быть полезной при оценке прочности оболочек из углерод-углеродных композитных материалов со структурой из волокон.

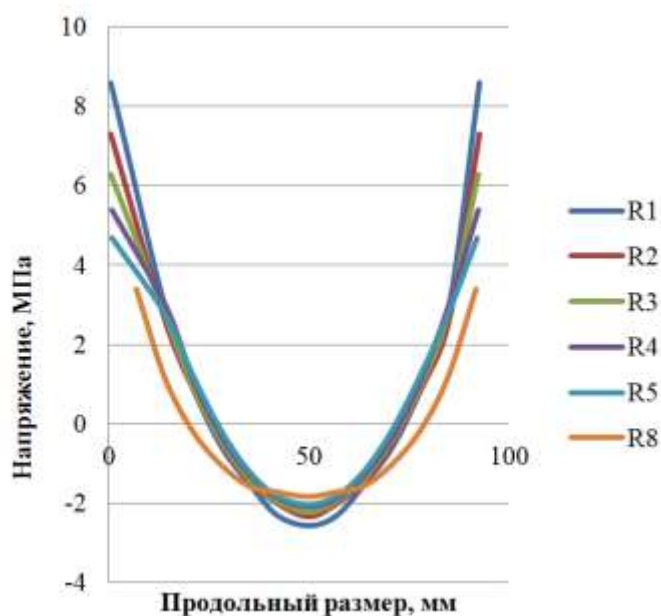


Рисунок 9. Распределение напряжений от воздействия силового фактора на внутренней поверхности боковой грани для различных углов

Сравнивая рисунок 9 с эпюрами распределения напряжений по К.К. Лихареву можно сказать, что в результате расчётов конечноэлементными методами учитывается влияние размеров радиусов скругления в углах модели. Это является преимуществом метода конечных элементов перед аналитическими методами на ранней стадии проектирования.

Проведение экспериментального исследования непосредственно на натуральных деталях изделия сложно и нецелесообразно по следующим причинам: сложно создать при испытании условия, в которых работает конструкция, затруднительно провести натуральный эксперимент в течение ресурса работы исследуемой детали, на изготовление детали предназначены дорогостоящие материалы, с дорогостоящей технологией изготовления. Для проведения эксперимента было намечено использовать метод фотоупругости, позволяющий получить НДС элемента, обусловленное его конструктивной формой, на моделях из оптически чувствительного материала. Наглядность данного метода позволила визуально наблюдать за возникновением и ростом напряжений в моделях, фиксируя опасные зоны.

Был изготовлен ряд моделей из эпоксидной смолы ЭД6-М (рис. 10,11), обладающей свойством двойного лучепреломления. Данное свойство возникает в деформированном состоянии образца, благодаря чему на экране (в поляризованном свете) появляется картина полос. По виду и числу полос можно судить об интенсивности напряжённого состояния детали.



Рисунок 10. Модель для силового эксперимента



Рисунок 11. Модель для температурного эксперимента

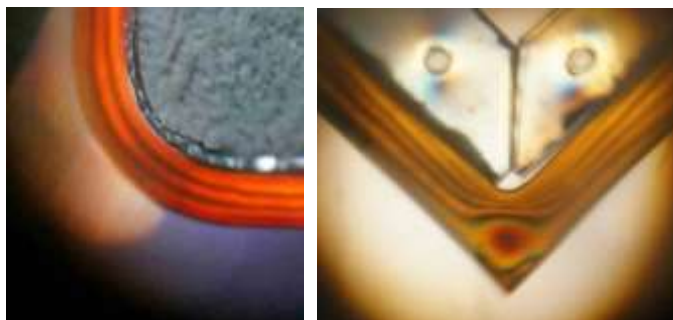


Рисунок 12. Картины полос для моделей температурного и силового экспериментов

Были проведены температурные и силовые эксперименты (рисунок 12) и переводя по формулам моделирования напряжения моделей в напряжения реальных объектов, были получены таблицы 5 и 6.

Таблица 5 – Величины напряжений и коэффициентов концентрации для различных радиусов для температурной задачи

R, мм	Количество полос		Напряжение, Па		Коэффициент концентрации
	В углу	На стороне	В углу	На стороне	
1	2,5	2	$1,72 \cdot 10^6$	$1,38 \cdot 10^6$	1,25
3	1,75	1,5	$1,2 \cdot 10^6$	$1,03 \cdot 10^6$	1,17
5	1,5	1,5	$1,03 \cdot 10^6$	$1,03 \cdot 10^6$	1
13	1,5	1,5	$1,03 \cdot 10^6$	$1,03 \cdot 10^6$	1
21,5	1,5	1,5	$1,03 \cdot 10^6$	$1,03 \cdot 10^6$	1
28,5	Не рассматривался				

Таблица 6 – Величины напряжений и коэффициентов концентрации для различных радиусов для силовой задачи

R, мм	Напряжение, Па		Коэффициент концентрации
	В углу	На стороне	
3	$4,13 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^6$	1,17
2	$4,47 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^6$	1,86
1	$4,82 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^6$	2
0,1	$5,5 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^6$	2,29

Значения коэффициентов концентраций напряжения в температурной и в силовой задаче, полученные экспериментальным методом, подтверждают результаты расчётов методом конечных элементов. Наблюдается погрешность, которая может быть связана с качеством материала моделей.

Можно сделать выводы, что напряжения в углах моделей, возникающие от воздействия давления, очень чувствительны к внутреннему радиусу (в отличие от температурных напряжений). Это может говорить о целесообразности отдельного рассмотрения этих факторов при расчётах напряжённо-деформированного состояния. Раздельная оценка коэффициентов концентрации напряжений по осям x и y может быть полезной при оценке прочности оболочек из углерод-углеродных композитных материалов со структурой из волокон.

Заключение

1. Рассматривались две конструктивные схемы двигательных установок для высокоскоростных летательных аппаратов.

2. Первичную оценку напряжённо-деформированного состояния рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

- а) приближёнными методами,
- б) методом конечных элементов,
- в) методом конечных элементов в местах концентрации напряжений

Такой алгоритм позволяет выявить опасные с точки зрения НДС места как подфюзеляжной, так и осесимметричной схемы.

3. Во всех случаях в качестве материала конструкции рассматривался углерод-углеродный композитный материал (УУКМ). Учитывались его основные особенности, среди которых: низкие коэффициент теплопроводности и коэффициент Пуассона, анизотропия свойств и др.

4. Были предложены два критерия: температурный K_T и силовой K_C , учитывающие особенности использованного материала конструкции и различную природу возникновения напряжённого состояния от воздействия градиента температур и силового воздействия. Критерии могут быть использованы для отдельного анализа напряжённого состояния от воздействия температур и механических усилий.

5. Показано, что в многослойной цилиндрической оболочке из углеродных волокон при ее внутреннем подогреве радиальное напряжение и теплопроводность в радиальном направлении оказывают взаимное влияние через контактный теплообмен и контактные силы. Результаты расчета позволили выявить качественную и количественную взаимосвязь диаметров волокон, размеров контактных пятен и контактных сил. Эти результаты могут быть использованы при выборе размеров углеродных волокон для оболочек двигателей. На основании рассмотрения контактной задачи теплообмена в

волокнах УУКМ было предложено также учитывать влияние твёрдости поверхностного слоя волокна.

6. Выполнено численное моделирование напряжений в каналах коробчатой формы с различными радиусами закруглений в углах. Показано, что коэффициенты концентрации напряжений в опасных местах существенно отличаются при нагружении температурным градиентом и внутренним давлением. Это подтверждает целесообразность отдельного рассмотрения температурной и силовой задачи.

7. Напряжённое состояние моделей, соответствующих каналу коробчатого сечения и изготовленных из оптически активного материала, изучалось на поляризационно-проекционной установке. Проверка методом фотоупругости позволила получить близкие, по отношению к расчётным, коэффициенты концентрации напряжений и подтвердила целесообразность отдельного рассмотрения НДС от нагружения температурным градиентом и внутренним давлением.

8. С помощью современных CAE-систем пока не удаётся выполнять точные расчёты на прочность сложных пространственных конструкций из УУКМ. Результаты, полученные в настоящей работе, позволяют использовать их на раннем этапе проектирования.

9. Расчётным и экспериментальным путём установлена количественная взаимосвязь между геометрическими характеристиками коробчатого канала и величинами коэффициентов концентрации напряжений.

10. В многоканальных коробчатых и цилиндрических двухъярусных оболочках с радиальными стойками расчётами МКЭ выявлены места наибольших напряжений и предложены рекомендации по их снижению.

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Абашев В.М., Демидов А.С., Хомовский Я.Н., Киктев С.И., Ерёмкин И.В. Температурные напряжения в цилиндрической оболочке из углеродных волокон и

контактная задача теплообмена // Журнал «Вестник Московского авиационного института». 2017. Т. 24, №4 С. 7-13.

2. Хомовский Я.Н. О концентрации напряжений в тонкостенных каналах газоздушного тракта ГПВРД // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. №8. С. 34-36.

3. Хомовский Я.Н. Исследование особенностей напряженного состояния канала коробчатой формы прямоточного двигателя // Труды МАИ. 2018. №101. URL: http://mai.ru/upload/iblock/706/КНомовskiy_rus.pdf

4. Хомовский Я.Н. Влияние радиусов сопряжения стенок коробчатых каналов гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя на их напряжённое состояние // Двигатель. 2018. №4 с. 16-17.

Другие публикации:

5. Хомовский Я.Н., Демидов А.С. Особенности расчётов и выбор критериев напряжённо-деформированного состояния для тонкостенных конструктивных элементов из углерод-углерод композитных материалов // Sciences of Europe. 2016. Vol. 4. № 9(9). С.80-84.