

УДК 004.942

На правах рукописи



Ляшенко Алексей Иванович

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕМНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ  
СЛОЖНЫХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Специальность

05.13.12 – Системы автоматизации проектирования  
(отрасль – авиационная и ракетно-космическая техника)

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук,  
профессор Абашев В.М.

Москва – 2014

## **РАБОТА ВЫПОЛНЕНА**

**на кафедре «Конструкция и проектирование двигателей» в «Московском авиационном институте» (национальном исследовательском университете)**

### **Научный руководитель:**

Директор Института повышения квалификации и переподготовки МАИ, доктор технических наук, профессор, В.М. Абашев

### **Официальные оппоненты:**

Заведующий кафедрой «Теплофизические приборы и аппараты» Московской государственной академии приборостроения и информатики, доктор технических наук, профессор, почетный работник Высшего профессионального образования РФ, Б.Т. Ерохин

Ведущий инженер-прочнист ООО «Волга-Днепр-Москва», кандидат технических наук А.А. Загордан

### **Ведущее предприятие:**

ОАО «Национальный институт авиационных технологий» (ОАО «НИАТ»),  
127051, г. Москва, ул. Петровка, 24.

Защита состоится 29 декабря 2014 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.125.13 «Московского авиационного института» (национального исследовательского университета) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, главный административный корпус, зал заседаний ученого совета.

*Просим Вас принять участие в обсуждении диссертационной работы или прислать свой отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, по указанному выше адресу.*

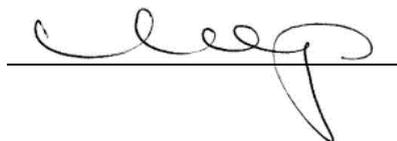
*Для участия в заседании диссертационного совета необходимо заблаговременно заказать пропуск по тел. +7 (499) 158 4591.*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института. С авторефератом диссертации можно ознакомиться на сайте ВАК РФ по адресу <http://vak.ed.gov.ru>.

Автореферат диссертации размещен на сайте ВАК РФ «26» октября 2014 г.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета Д212.125.13  
кандидат технических наук, профессор



Л.В. Маркин

# **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

## **Актуальность темы**

Актуальным направлением развития качества проектирования конструкций является совершенствование научно-методического обеспечения САПР, позволяющего повысить точность вычисления оптимальных габаритно-массовых параметров конструкций, снизить их габаритно-массовые характеристики и повысить надежность. Разработка и исследование моделей, алгоритмов и методов для синтеза и анализа проектирования проектных решений, включая конструкторские и технологические решения в САПР, служат основой такого совершенствования. Это позволяет повысить качество реализации жизненного цикла проектирования-производства-эксплуатации изделия.

При проектировании конструкций широко используются CAD/CAE компьютерные системы САПР: NASTRAN, ANSYS, COSMOS и др. Часто их применение осложняется проблемой качественного взаимодействия модулей системы или самих систем между собой при решении сложных задач проектирования. К каким задачам относится оптимизация конструкций, содержащих большое число переменных проектирования, при упругом и упруго-пластическом поведении металлических материалов. Подобные сложные конструкции имеют ракетные двигатели, относящихся к сложным авиационным и ракетно-космическим техническим системам.

К ракетным двигателям относятся: жидкостные ракетные двигатели (ЖРД), ракетные двигатели твердого топлива (РДТТ), ракетно-прямоточные двигатели (РПД) на жидком, твердом и пастообразном топливах и др. Они широко используются в авиационных и ракетных комплексах, в космической технике. Конструкции двигателей, их отсеков и экспериментальных стендов отличаются большим разнообразием по функциональному назначению, геометрическим формам и видам нагружения. Применяются однослойные и двухслойные цилиндрические и плоские оболочки, слабokonические и конические оболочки, стержни, трубки, лопатки, пластины. Эти тонкостенные

элементы посредством разъемных и неразъемных соединений образуют конструкции. Их сложность состоит в том, что каждый из указанных элементов имеет свои индивидуальные функциональные, геометрические и механические свойства. Подавляющее число исследований подобных конструкций посвящено оптимизации отдельных элементов или всей конструкции. При оптимизации отдельных элементов получают существенно приближенные решения из-за использования приближенных граничных условий. При оптимизации всей конструкции современные компьютерные системы оперируют с большим числом переменных проектирования, что не дает возможность найти точное оптимальное решение, учесть индивидуальные функциональные, геометрические и механические особенности отдельных элементов конструкции. Получение достоверных результатов осложняется необходимостью комплексного использования различных компьютерных систем и их вычислительных модулей, а такая методика в настоящее время отсутствует.

Расчеты общей несущей способности двухслойных связанных оболочек, работающих в условиях действия значительных по величине статических распределенных и сосредоточенных сил и градиентов температуры, проводятся для плоского напряженно-деформированного состояния. Для объемной задачи такая методика отсутствует.

Эти и другие недостатки применения различных САЕ-систем САПР не дают возможность повысить точность оптимизационных расчетов однослойных оболочечных конструкций при решении объемной задачи, учитывающей индивидуальные функциональные, геометрические и механические особенности отдельных элементов конструкции. Решение задачи объемной общей несущей способности двухслойных связанных оболочек позволит повысить точность расчетов таких теплонапряженных элементов конструкции, какими являются корпуса камер сгорания с регенеративным охлаждением.

Вышеперечисленные задачи пока не получили своего решения и поэтому являются предметом исследования данной диссертации.

## **Цель и задачи диссертации**

Цель диссертации заключается в разработке научно-методического обеспечения САПР, основанного на применении новых автоматизированных методов, позволяющих оптимизировать габаритно-массовые характеристики трехмерных сложных конструкций ракетных двигателей для авиационной и ракетно-космической техники. Сформулированы следующие задачи:

1. Разработать автоматизированный метод исследования объемной статической прочности однослойных оболочечных конструкций.
2. Разработать автоматизированный метод исследования объемной общей несущей способности двухслойных связанных оболочек.
3. Провести анализ экспериментальных данных, необходимых для верификации математических методов.
4. С помощью разработанных автоматизированных методов выполнить расчеты и сформировать эффективные схемно-конструктивные решения для отсека РДТТ, ЖРД и РПД.
5. Экспериментально подтвердить эффективность разработанных схемно-конструктивных решений.
6. Разработать рекомендации по улучшению характеристик элементов конструкций отсека РДТТ, ЖРД и РПД.

## **Научная новизна исследования**

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

1. Реализован автоматизированный метод исследования объемной статической прочности однослойных оболочечных конструкций, позволяющий оптимизировать взаимосвязанные конструкции однослойных оболочек, стержней, пластин и трубок. Проведена его успешная верификация на основе экспериментальных исследований.
2. Реализован автоматизированный метод расчета объемной общей несущей способности двухслойных связанных оболочек. Проведена его успешная верификация на основе экспериментальных исследований.

3. Проведена оптимизация массы основания корпуса отсека РДТТ на основе автоматизированного метода исследования объемной статической прочности однослойных оболочечных конструкций и сформулированы рекомендации по изменению его конструкции.
4. Определена объемная несущая способность камеры ЖРД на основе автоматизированных методов исследования объемной статической прочности однослойных оболочечных конструкций и расчета объемной общей несущей способности двухслойных связанных оболочек; даны рекомендации по изменению конструкции.
5. Выполнен выбор оптимальной геометрической формы плоских камер сгорания РПД на основе метода расчета объемной общей несущей способности двухслойных связанных оболочек.
6. Представлены рекомендации для проектирования жаровых труб экспериментального стенда на основе метода расчета объемной общей несущей способности двухслойных связанных оболочек.

### **Предмет и объект исследований**

Предметом исследований являются математические модели и алгоритмы автоматизированных расчетов напряженно-деформированного состояния сложных конструкций.

Объекты исследований – расчетные модели напряженно-деформированного состояния сложных авиационных и ракетно-космических конструкций.

### **Методы исследования**

Разработанные в диссертационной работе методы основываются на общепринятых физических моделях и математических методах, в том числе методах конечных элементов и анализа чувствительности. Достижение поставленных целей осуществлялось путем расчетно-экспериментальных исследований. Расчеты осуществлялись с помощью инженерных методик, новых и известных численных методов с использованием САД/САЕ-систем САПР типа

SolidWorks и COSMOS. Эксперименты проводились: на стенде для прочностных испытаний крупногабаритных конструкций, обеспечивающем создание осевых растягивающих и сжимающих сил, изгибающих и крутящих моментов; на экспериментальном огневом подогревателе, обеспечивающем холодные и огневые режимы работы, создание давлений газа в камере и жидкости в межрубашечном тракте, регистрацию напряженно-деформированного состояния корпуса.

### **Достоверность научных положений**

Определяется корректностью поставленных задач, проведенными экспериментальными исследованиями, успешной верификацией математической модели.

### **Практическая ценность результатов**

С помощью разработанных автоматизированных методов решен ряд задач, имеющих практическую значимость для авиационной и ракетно-космической техники.

Проведена оптимизация сложной конструкции отсека РДТТ, разработанной в ФГУП «Корпорация «МИТ». Расчеты позволили обеспечить ее работоспособность и снижение массы отсека на 11,6%. В настоящее время эта конструкция находится в эксплуатации.

Применяя автоматизированный метод расчета общей объемной несущей способности двухслойной оболочечной конструкции, рассчитаны новые конструкции камеры ЖРД, жаровых труб экспериментальных стендов для исследования конструкций РПД и определена оптимальная геометрическая форма плоской камеры сгорания для перспективного РПД. Экспериментальные стенды и плоские камеры сгорания, разработанные в ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова», в настоящее время активно применяются во время отработки конструкций перспективных РПД.

Разработанные в диссертационной работе автоматизированные методы широко используются в учебном процессе МАИ при проведении занятий по

САПР и выполнению курсовых и дипломных проектов по проектированию конструкций РДТТ, ЖРД и РПД.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Автоматизированный метод исследования объемной статической прочности однослойных оболочечных конструкций.
2. Автоматизированный метод расчета объемной общей несущей способности двухслойных связанных оболочек.
3. Результаты расчетных исследований напряженно-деформированного состояния сложных авиационных и ракетно-космических конструкций.
4. Анализ результатов экспериментальных исследований корпуса отсека РДТТ и жаровых труб экспериментального стенда для РПД.
5. Рекомендации по проектированию конструкций корпуса отсека РДТТ, камеры ЖРД, жаровых труб экспериментального стенда и плоских камер сгорания РПД.

### **Личный вклад автора**

Автор являлся ведущим разработчиком автоматизированных методов и ответственным экспериментатором расчетно-экспериментальных исследований, входящих в тематические планы и технические задания МАИ, ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова» и ФГУП «Корпорация «МИТ». Из публикаций в диссертацию включены результаты, полученные автором самостоятельно и при его непосредственном участии со своим руководителем и коллегами. Содержание диссертации и автореферата обсуждено и согласовано со всеми соавторами.

### **Реализация работы**

Результаты диссертационной работы внедрены: в научно-производственные процессы ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова», ФГУП «Корпорация «МИТ» и научно-учебный процесс МАИ. На основании разработанных автоматизированных методов и схемно-конструктивных решений осуществляется проектирование демонстраторов высокоскоростных

РПД и эксплуатация отсека РДТТ. Учебное пособие используется в чтении лекций по САПР, в курсовом и дипломном проектировании конструкций ракетных двигателей авиационной и ракетно-космической техники.

### **Апробация работы**

Результаты работы по мере их получения были доложены на 6 международных конференциях, Проблемном совете «Комбинированные двигательные установки для высокоскоростных аэрокосмических летательных аппаратов», научных семинарах кафедры «Конструкция и проектирование двигателей» МАИ.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 13 научных трудов, 3 из них – в изданиях, рекомендованных ВАК.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы из 94 наименований, приложения, содержит 103 рисунка, 13 таблиц. Общий объем работы 179 страниц, включая рисунки и таблицы.

**В первой главе** приведен обзор публикаций, посвященных автоматизированным методам САПР, их применению для решения задач оптимизации сложных конструкций, исследованиям прочности и оптимизации однослойных и двухслойных сложных конструкций, сформулированы задачи исследования.

*Обзор состоит из пяти частей.*

В первой части приведены публикации, содержащие результаты исследований прочности сложных конструкций с использованием систем САПР. В России наиболее популярны системы: NASTRAN, ANSYS и COSMOS. Их методики расчета и анализа прочности конструкций основаны на методе конечных элементов (МКЭ). Выявлены этапы проведения расчетов. Рассмотрены модули оптимизации конструкции подсистем САПР. Оптимизация конструкции проводится после выполнения расчетов: статических,

устойчивости, тепловых и собственных форм колебаний. Анализ литературных источников показал, что при комплексном использовании различных компьютерных систем САПР и их вычислительных модулей для оптимизации всей конструкции, имеется большое число переменных проектирования. Это не дает возможность найти точное оптимальное решение, учесть индивидуальные функциональные, геометрические и механические особенности отдельных элементов конструкции.

Рассмотрены методы и алгоритмы, использующие МКЭ для расчета напряженно-деформированного состояния. Значительный вклад в теорию и практику МКЭ внесли Абашев В.М., Алямовский А.А., Батэ К., Вилсон Е, Зенкевич О., Морозов Е.М., Мяченков В.И., Оден Дж., Постнов В.А., Сегерлинд Л., Стренг Г., Чанг И., Шимкович Д.Г. и др. Проведен анализ основного алгоритма МКЭ. Выяснено, что это метод является одним из самых эффективных для определения напряженно-деформированного состояния, в том числе объемного. Анализ показывает, что перемещения рассчитываются с точностью 0,2...0,5%, а напряжения – 15...25%.

Оптимальному проектированию конструкций посвящены работы: Абашева В.М., Ароры Я., Баничука Н.В., Болдырева А.В., Комкова В., Малкова В.П., Постнова В.А., Прагера В., Угодчикова А.Г., Хога Э., Чоя К. и др. Предложены различные методы оптимизации: геометрической теории упругости, квадратичной аппроксимации целевой функции, покоординатного спуска на единичном отрезке, итерационного определения оптимальной формы осесимметричного твердого тела, генетического алгоритма и др. В качестве минимизируемых критериев выбираются интегральные функционалы: массы, рассогласования между величинами давления, перемещения свободного конца консоли, устойчивости стержня, жесткости оболочечной конструкции, глубины проникновения внедряющегося тела в твердую деформируемую среду и др. Наиболее перспективным является конечноэлементный метод анализа чувствительности конструкций.

Анализ литературных источников, посвященных проектированию конструкций РДТТ, ЖРД и РПД, позволил оценить существующие методы создания оптимальных конструкций и определить их геометрические формы. Большинство элементов конструкции выполняются из однослойных и двухслойных оболочек. При расчете в настоящее время широко используются САД/САМ компьютерные системы САПР. Выводы сделаны на основе анализа работ Абашева В.М., Абугова Д.И., Алемасова В.Е., Бобылева В.М., Быцкевича В.М., Гахуна Г.Г., Губертова А.М., Добровольского М.В., Ерохина Б.Т., Котельникова А.В., Кудрявцева В.М., Липанова А.М., Миронова В.В., Обносова Б.В., Овсянникова Б.В., Сорокина В.А., Ягодникова Д.А., Яновского Л.С. и др.

Несущую способность камеры ЖРД и аналогичных конструкций выполняют с помощью одномерного графо-аналитического метода и (или) численного двухмерного метода, предложенных В.И. Феодосьевым.

Применение современных систем САПР для оптимизации сложных конструкций часто приводит к неправильному решению. Приходится применять неэффективный итерационный процесс оптимизации.

Существующие методики определения общей несущей способности двухслойных взаимосвязанных оболочечных конструкций позволяют рассчитывать приближенное напряженное состояние. Расчет несущей способности при объемном напряженно-деформированном состоянии должен повысить точность вычислений.

На основании проведенного анализа литературных источников, выявленных недостатков и нерешенных проблем, сделаны выводы об актуальности создания автоматизированных методов трехмерной оптимизации и расчета напряженно-деформированного состояния сложных конструкций; сформулированы задачи исследования.

**Во второй главе** представлены геометрические объекты и автоматизированные методы исследования объемной статической прочности сложных оболочечных конструкций.

К сложным оболочечным однослойным конструкциям относится металлический корпус (рис. 1а). Рассмотрено три вида двухслойных конструкций: камера ЖРД (рис. 1б), жаровая труба (рис. 1в) и плоская камера сгорания (рис. 1г). Жаровая труба и плоская камера имеют различные конструктивные варианты.

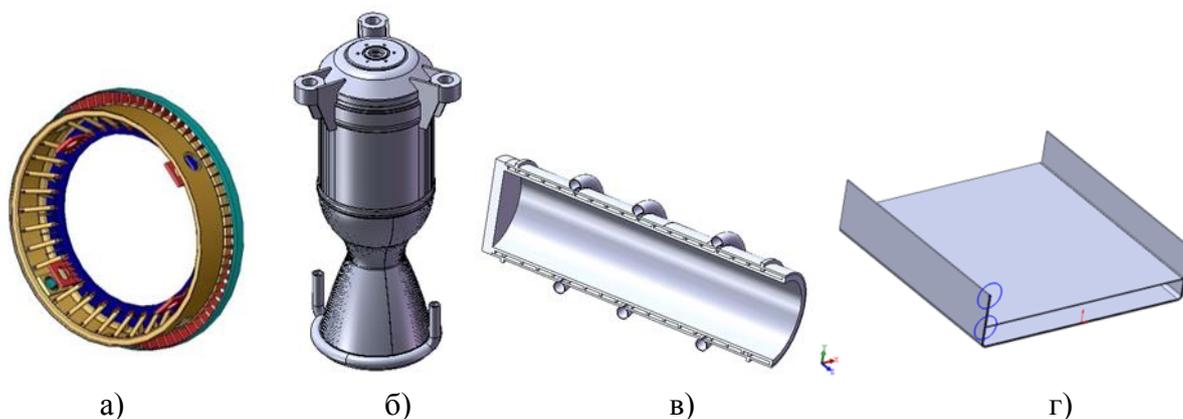


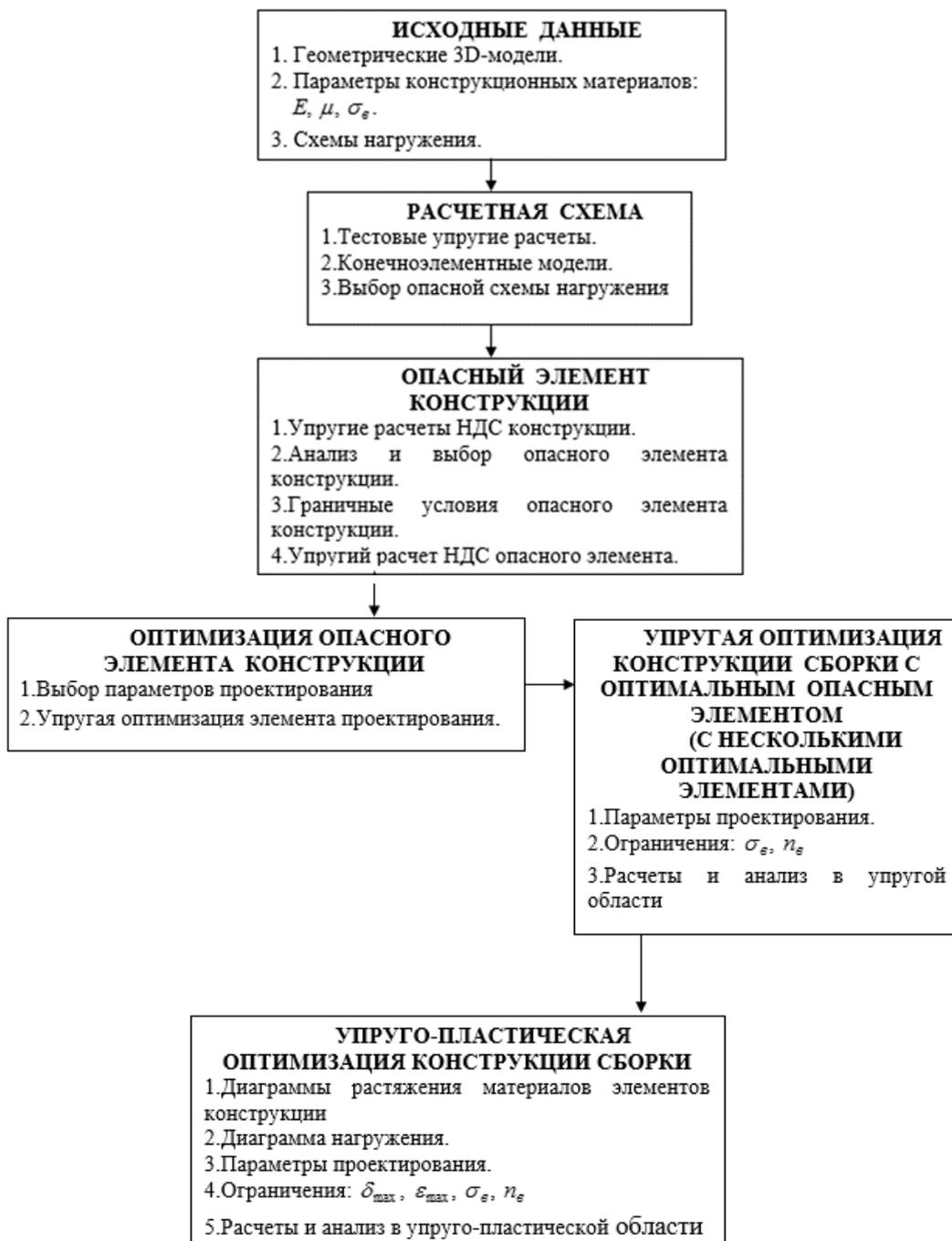
Рис. 1 Геометрические 3D-модели объектов исследования

Разработан автоматизированный метод исследования объемной статической прочности однослойных оболочечных конструкций (рис. 2). Он основан на декомпозиции конструкции, проведении последовательной оптимизации и анализе расчетных и экспериментальных исследований. На основе упругого расчета всей конструкции выделяется наиболее напряженный элемент конструкции. Опасный элемент оптимизируется отдельно. Затем выполняется оптимизация всей конструкции, содержащей оптимальный опасный элемент. Такая оптимизация проводится последовательно для других, выделенных элементов. Затем проводится упруго-пластическая оптимизация. Составной частью метода является проведение испытаний.

Расчеты проводятся с использованием оптимизационной подсистемы, находящейся в составе CAE-системы COSMOS.

Разработан метод исследования объемной общей несущей способности двухслойных связанных оболочек (рис. 3). Особенностью предлагаемого метода является введение комплекса ограничений:  $(\sigma_i)_1 < (\sigma_B)_1$  ,  $(\sigma_i)_2 < (\sigma_B)_2$  ,  $(\varepsilon_{II})_1 < (\varepsilon_{пред})_1$  ,  $(\varepsilon_{II})_2 < (\varepsilon_{пред})_2$  и решение объемной задачи.

В третьей главе приведена численная реализация предложенных методов. Автоматизированный метод исследования объемной статической прочности однослойных оболочечных конструкций реализован при расчете металлического корпуса (рис. 1а).



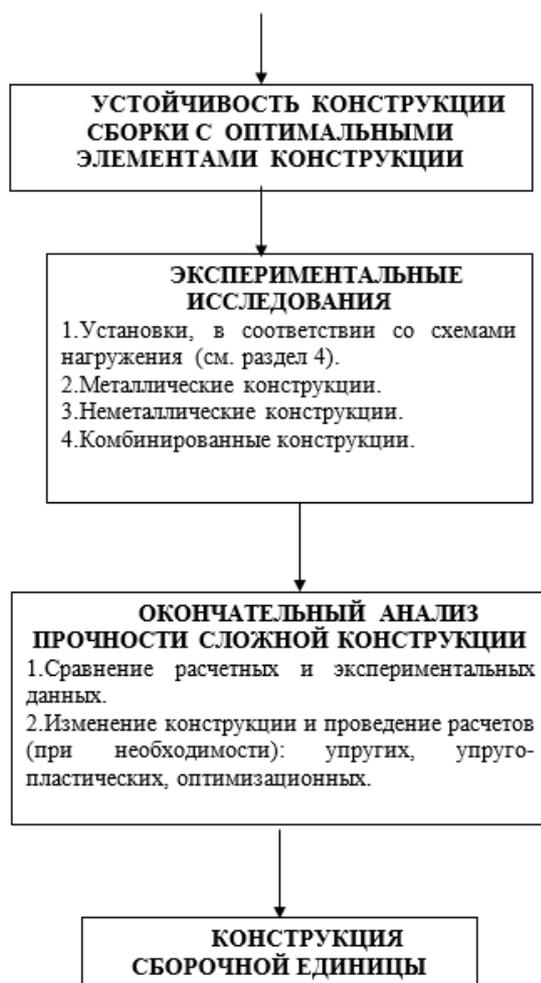


Рис. 2 Структурная схема алгоритма автоматизированного метода исследования объемной статической прочности однослойных оболочечных конструкций

Анализ результатов показал, что наиболее напряженными местами являются трубки (место 1) и наружная поверхность оболочки в областях соединения с трубками (место 2), рис. 4. Наибольшие перемещения присутствуют в краевой части платы и нижней части шпангоута. Вдоль стержней наблюдается запас прочности  $n_B < 1.4$ .

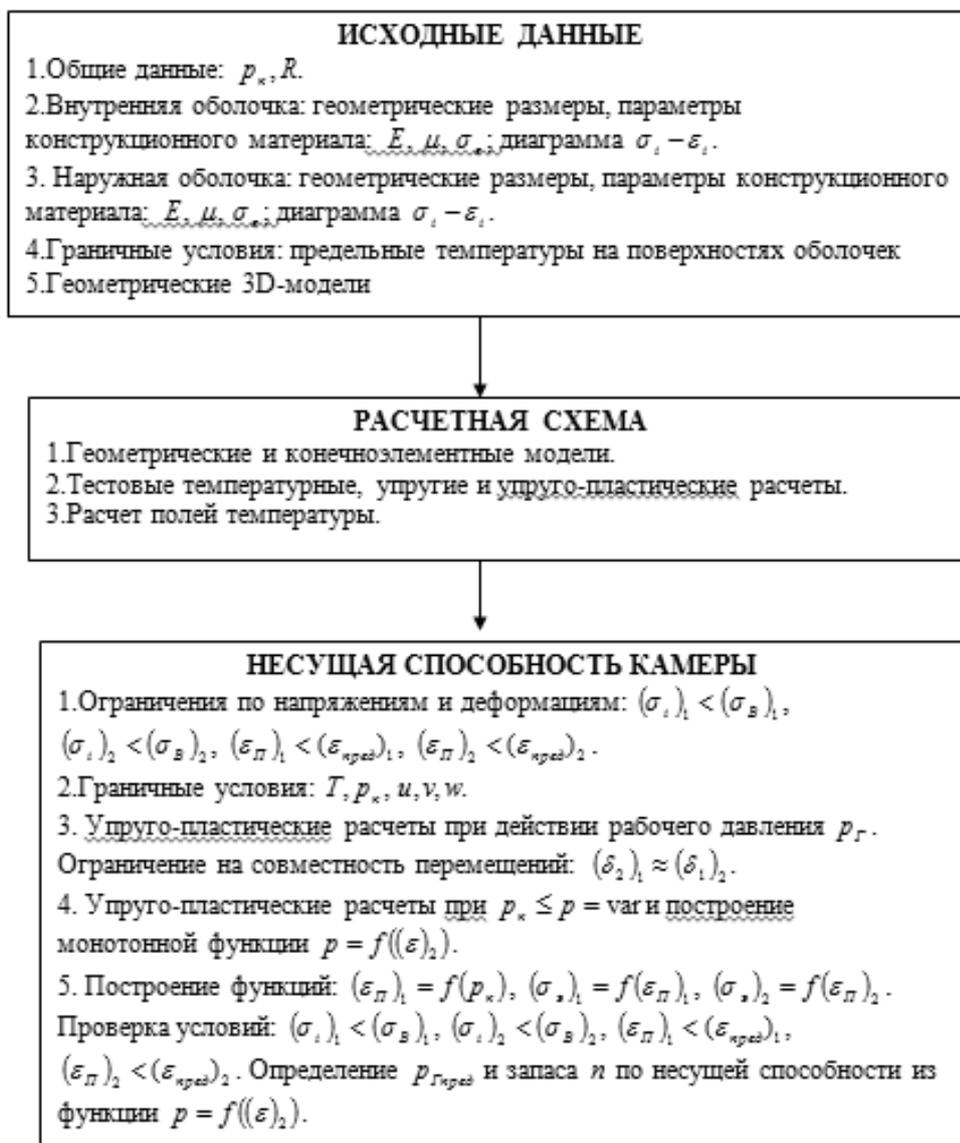


Рис. 3 Структурная схема алгоритма автоматизированного метода исследования объемной общей несущей способности двухслойных связанных оболочек

Проведено исследование напряженно-деформированного состояния сборочной единицы «Труба в сборе», как наиболее опасного элемента. Из расчетов корпуса определяются численные значения перемещений  $u_x, u_y, u_z$  на концах «Трубы в сборе» в глобальной системе координат. По зависимостям

$$u_x = u_{xg}; \quad (1)$$

$$u_y = u_{yg} \cos \alpha - u_{zg} \sin \alpha;$$

$$u_z = u_{zg} \cos \alpha + u_{yg} \sin \alpha$$

находятся численные значения перемещений в локальной системе координат.

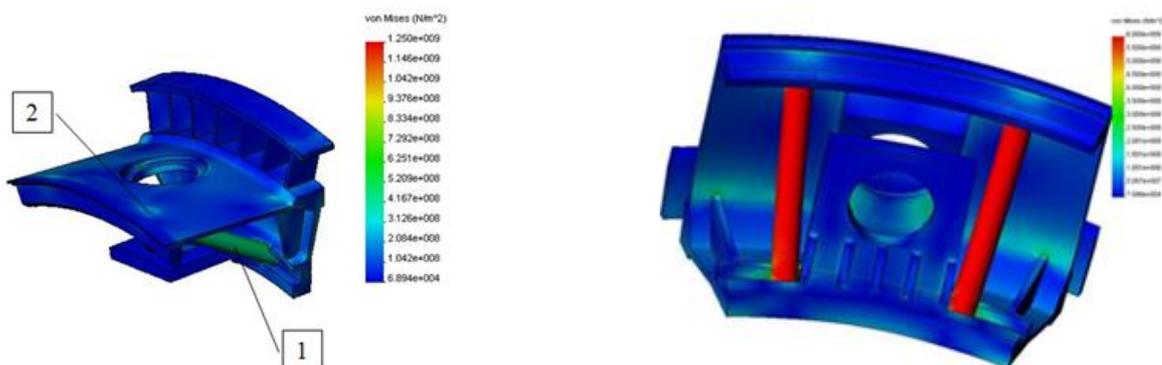


Рис. 4 Структурная схема алгоритма автоматизированного метода исследования объемной общей несущей способности двухслойных связанных оболочек

Проводится оптимизация опасной сборочной единицы. Использовались плоские треугольные изгибно-мембранные конечные элементы с 18 степенями свободы. Тестовые расчеты показали, что ошибка по напряжениям 12-18% и по перемещениям 3-7%.

Затем проводится расчет напряженно-деформированного состояния корпуса с оптимальными трубками. Значительно снизились напряжения в трубках, исчезли опасные зоны на наружной поверхности оболочки и наблюдается общая тенденция снижения напряжений во всей конструкции.

Проведена оптимизация конструкции в области упруго-пластических деформаций. Получено, что конструкция корпуса имеет минимальную массу при толщинах шпангоута  $h_{шп} = 4 \text{ мм}$  и оболочки  $h_{об} = 5 \text{ мм}$ . Масса конструкции снизилась на 11,6%, что составляет 37,2 кг.

Проведен расчет объемной несущей способности цилиндрической части камеры ЖРД. Тестовые расчеты позволили определить, что точность вычисления температурных полей 8,2%, перемещений 3,1% и напряжений 18,8%.

Используя полученное распределение температур, выполнено исследование объемной общей несущей способности камеры. Наибольшие эквивалентные напряжения  $\sigma_3 = 303,7 \text{ МПа}$  присутствуют на наружной поверхности кольца, соединяющего огневое и среднее днища форсуночной головки. Наибольшие перемещения  $(\delta_{\max 2})_2 = 0,667 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  наблюдаются на

наружной поверхности наружной оболочки камеры. Сравнение вычисленных перемещений  $(\delta_2)_1 = (0,465 \dots 0,658) \cdot 10^{-3} \text{ м}$  в вершинах ребер внутренней оболочки с перемещениями на внутренней поверхности наружной оболочки показывает, что условие совместности деформаций оболочек выполняется. Ошибка составляет значение  $-(0,22 \dots 0,76)\%$ . Вычисленные полные максимальные значения относительных деформаций  $(\varepsilon_{II})_1 = 0,019 \dots 0,02$  не превышают предельные значения  $\varepsilon_{пред} = 0,03$  для соответствующих оболочек.

При определении предельного значения давления  $p_{Гпред}$  варьируется величина давления в камере в диапазоне  $p = (16,5 \dots 100) \text{ атм}$ . Расчеты показывают, что функция  $p = f((\varepsilon)_2)$ , которая обычно используется для определения  $p_{Гпред}$ , изменяется монотонно и в ней отсутствует характерный участок, на котором малому изменению давления соответствует большое изменение деформации. Для определения величины предельного давления газа воспользуемся системой критериев:  $(\sigma_s)_1 < (\sigma_B)_1$ ,  $(\sigma_s)_2 < (\sigma_B)_2$ ,  $(\varepsilon_{II})_1 < (\varepsilon_{пред})_1$ ,  $(\varepsilon_{II})_2 < (\varepsilon_{пред})_2$ . Параметры вычисленного деформированного состояния во внутренней оболочке удовлетворяют третьему условию, так как предельная полная деформация равна 0,03 (рис. 5). Поведение этой функции объясняется перераспределением максимальной деформации от форсуночного блока к центру оболочки по мере роста давления.

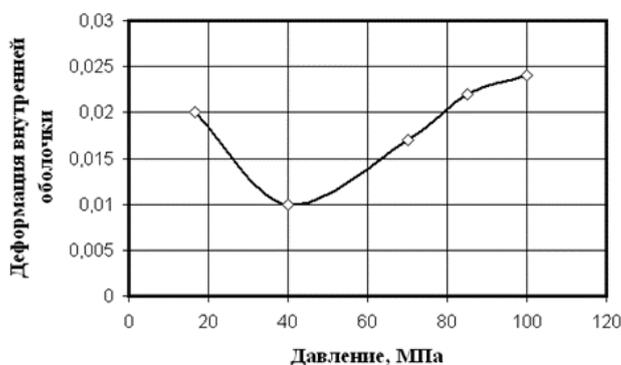


Рис. 5

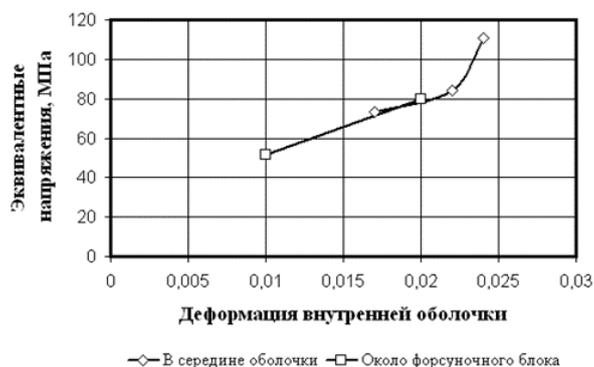


Рис. 6

Из зависимости влияния максимальной деформации на эквивалентные напряжения внутренней оболочки (рис. 6) определяется допустимая

деформация. Для материала БрХ-08, из которого изготовлена внутренняя оболочка, предельными характеристиками прочности являются: предел прочности  $(\sigma_B)_1 = 102 \text{ МПа}$  и относительная деформация  $(\varepsilon_{\max})_1 = 0,03$  при соответствующей температуре. Учитывая запас прочности  $n_B = (1,3...1,5)$ , получим допустимое значение эквивалентных напряжений  $(\sigma_{\varepsilon\max})_1 = (\sigma_B)_1 / n_B = 78,5 \text{ МПа}$ , где выбрано  $n_B = 1,3$ . Вычисленные максимальные напряжения удовлетворяют условию  $(\sigma_s)_1 < (\sigma_B)_1$ . Из графика, представленного на рис. 6, по допустимому значению эквивалентных напряжений  $(\sigma_{\varepsilon\max})_1 = 78,5 \text{ МПа}$ , находим  $(\varepsilon_{\text{дон}})_1 = 0,02$ . Эта величина удовлетворяет условию  $(\varepsilon)_1 < (\varepsilon_{\max})_1$ .

Наибольшие значения деформаций и эквивалентных напряжений в наружной оболочке наблюдаются в ее средней части. На рисунке 7 показана функциональная зависимость между ними. В соответствии с исходными данными, для материала 18Х18Н9Т, из которого изготовлена наружная оболочка, предельными характеристиками прочности являются: предел прочности  $(\sigma_s)_2 = 342 \text{ МПа}$  (соответствует условию  $(\sigma_s)_2 < (\sigma_B)_2$ ) и относительная деформация  $(\varepsilon_{\max})_2 = 0,025$  (соответствует условию  $(\varepsilon)_2 < (\varepsilon_{\max})_2$ ) при соответствующей температуре. Учитывая запас прочности  $n_s = (1,3...1,5)$ , получим допустимое значение эквивалентных напряжений  $(\sigma_{\varepsilon\max})_2 = (\sigma_s)_2 / n_s = 263,1 \text{ МПа}$ , где выбрано  $n_s = 1,3$ . Из графика, представленного на рис. 7, находим  $(\varepsilon_{\text{дон}})_2 = 0,0063$ .

Воспользуемся функциональной зависимостью, показанной на рис. 8. Зная, что  $(\varepsilon_{\text{дон}})_2 = 0,0063$ , находим -  $p_{\text{Гпрод}} = 4,1 \text{ МПа}$ . Запас по несущей способности

$$n = \frac{p_{\text{Гпрод}}}{p_k} = \frac{4,1}{1,65} = 2,48 \quad (2)$$



Рис. 7

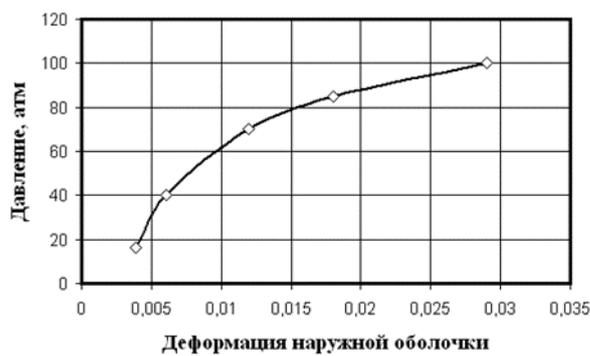


Рис. 8

В диссертационной работе также найдены общие объемные несущие способности конструкций жаровых труб (рис. 1в) и плоских камер сгорания, из которых наиболее в качестве перспективной выбрана камера с плоскими днищами (рис. 1г).

Наибольшие эквивалентные напряжения в камере сгорания с плоскими днищами присутствуют в месте соединения верхней оболочки с боковой стенкой, которое характеризуется большим градиентом температуры. Их величина  $\sigma_s = 7,669 \cdot 10^7 \text{ Па}$  (рис. 9). Следовательно, запас по пределу прочности –  $n = 1,83$ .

На рис. 10 видно поле распределения деформаций. Максимальная величина деформации достигает значения  $\varepsilon = 2,0 \cdot 10^{-3}$ , что существенно меньше предельного значения  $\varepsilon_{np} = 2,5 \cdot 10^{-2}$ .

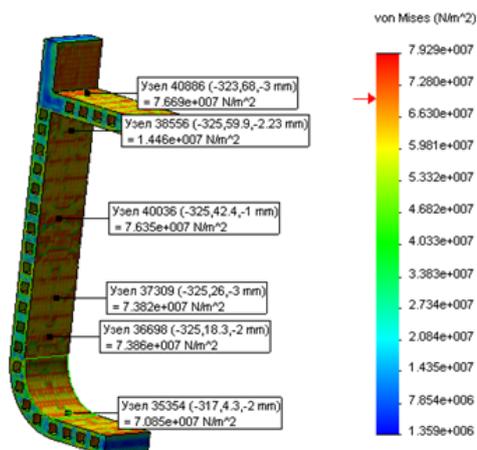


Рис. 9

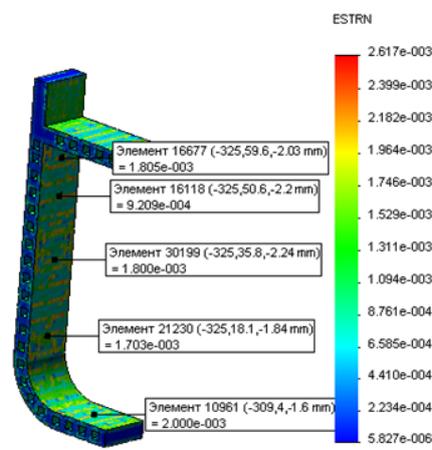


Рис. 10

Исследования показали, что методика расчета несущей способности камер сгорания может быть применима для конструкций разных геометрических форм, подверженных разным комплексам нагрузок.

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований взаимосвязанных сложных оболочечных конструкций.

На рис. 11 показана экспериментальная металлическая модель корпуса (а) и ее размещение на стенде (б). Стенд позволяет создавать растягивающие и сжимающие статические силы, крутящие и изгибающие моменты.

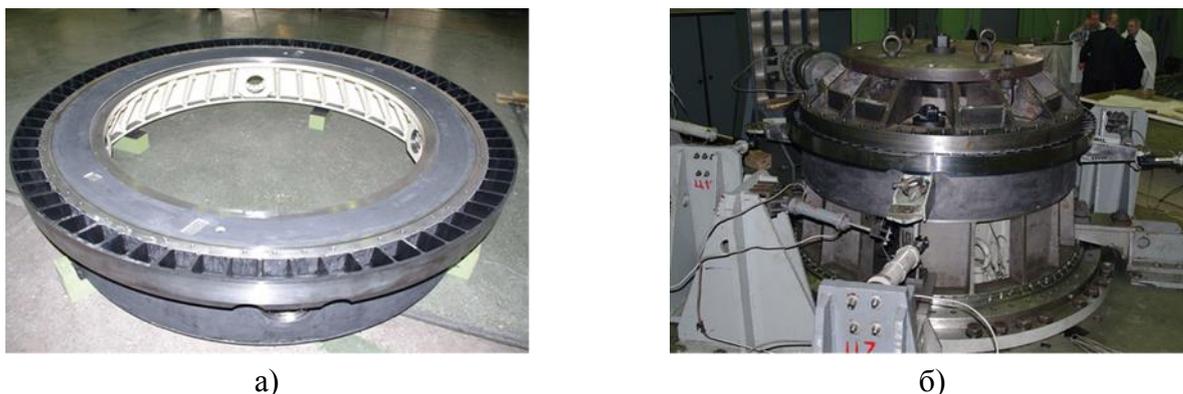


Рис. 11 Модель и экспериментальный стенд

При проведении экспериментов создаются нагрузки на (110...175)% большие, по сравнению с эксплуатационными силами. Время выдержки нагрузок при испытаниях не более 10 с. Испытания проводились для 4 комплексов нагрузок. Получено, что наиболее напряженной является конструкция при совместном действии сжимающих сил  $T_3=2980$  кН и  $T_4=650$  кН, составляющих 110% от эксплуатационных (рис. 12).



Рис. 12 Совместное действие эксплуатационных сил  $T_3$  и  $T_4$

Конструкция корпуса не разрушается и отсутствуют заметные большие деформации. Это подтверждает результаты расчетов, полученных в главе 3.

Если считать, что рост нагрузок пропорционален увеличению эквивалентных напряжений, то можно качественно оценить «остаточный» запас прочности. Он равен превышению вычисленного запаса прочности по сравнению с экспериментальной нагрузкой. Расчет показал, что величина «остаточного» запаса прочности –  $n_{ост} = 23,1\%$ . Расчеты остальных трех расчетных схем показали, что для них  $n_{ост} \geq (35...42)\%$ .

Проведены замеры деформаций на внешней стенке цилиндрической проставки огневого подогревателя стенда, содержащего жаровые трубы разных конструкций. Фотография проставки огневого подогревателя с тензодатчиками к1 и к2 показана на рис. 13а. Общая схема установки тензодатчиков к1...к6 показана на рис. 13б.

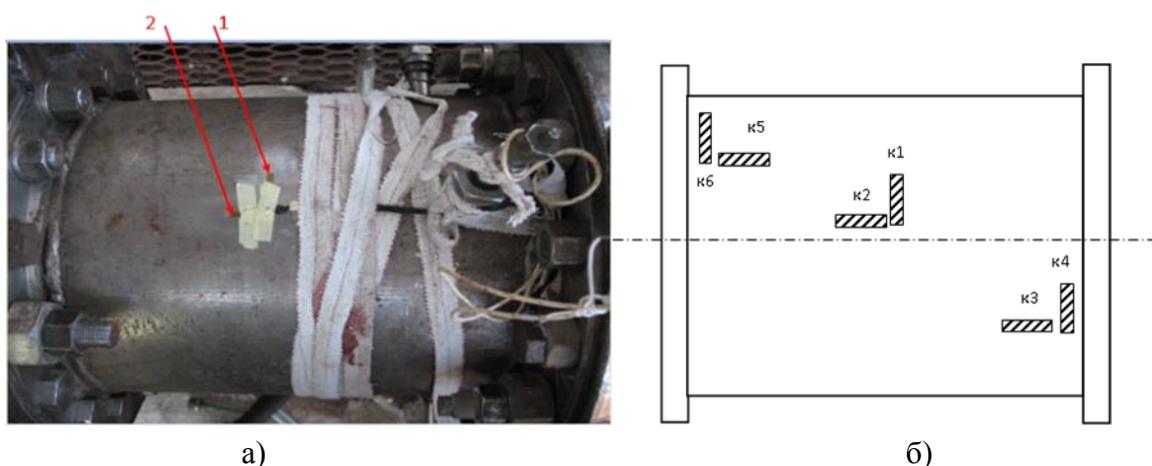


Рис. 13 Проставка огневого подогревателя и схема расположения тензодатчиков  
(1 – тензодатчик к1, 2 – тензодатчик к2)

Проведены испытания на режимах холодной продувки и высотных испытаниях.

На режиме холодной продувки в камеру подводят холодный воздух при давлении 13 бар. Одновременно в межрубашечный тракт камеры подводится вода под давлением 12 бар. Сравнение относительных полных деформаций с результатами расчетов в центральной части конструкции, соответствующей месту размещения тензодатчиков к1 и к2 на наружной поверхности проставки

огневого подогревателя, показали, что различие между расчетным и экспериментальными значениями полных деформаций составляет 7,8%. В окружном направлении ошибка расчета составляет величину 7,4%.

При высотных испытаниях в камере сгорания огневого подогревателя происходит процесс горения. На этом режиме максимальное давление в камере достигает величины  $\approx 50$  бар. Сравнение вычисленного значения полной относительной полной деформации с экспериментальными данными показало, что ошибка расчета составила 19,5%. Это можно объяснить неточными значениями исходных данных: давлении воды в межрубашечном тракте и температуры в оболочках.

**В приложении** представлены акты о внедрении результатов диссертационной работы.

## **ВЫВОДЫ**

1. Разработано научно-методическое обеспечение САПР, основанное на применении новых автоматизированных методов, позволяющих оптимизировать габаритно-массовые характеристики трехмерных сложных конструкций ракетных двигателей для авиационной и ракетно-космической техники.
2. Разработанный метод автоматизированного исследования объемной статической прочности однослойных оболочечных конструкций, позволяет оптимизировать сложные конструкции, состоящие из взаимосвязанных однослойных оболочек, стержней, пластин, трубок и др. Проведена его успешная верификация на основе экспериментальных исследований. Погрешность составляет: по напряжениям до 12 – 18%, по перемещениям до 3 – 7%.
3. Разработан автоматизированный метод расчета объемной общей несущей способности двухслойных связанных оболочек, позволяющий рассчитать двухслойные оболочечные конструкции. Различие между расчетным и экспериментальными значениями полных деформаций составляет для

статических условий 7,8% и при горении в камере 19,5%. В окружном направлении ошибка расчета составляет величину 7,4%.

4. Проведена оптимизация конструкции металлического корпуса отсека РДТТ, содержащего взаимосвязанные однослойные оболочки. Масса конструкции снижена на 11,6%, что составляет 37,2 кг. Даны рекомендации по оптимальному проектированию трубок.
5. Проведен расчет объемной несущей способности камеры ЖРД, содержащей двухслойные связанные оболочки. Запас по несущей способности составил  $n=2,46$ . Даны рекомендации по проектированию элементов конструкции камеры сгорания.
6. Проведен расчет объемной несущей способности конструкций жаровых труб, входящих в состав экспериментальной установки, предназначенной для создания высокоэнтальпийных воздушных потоков, направляемых в экспериментальный РПД. Корпуса жаровых труб состоят из двухслойных оболочек. Даны рекомендации по проектированию и выбору конструкционных материалов оболочек жаровых труб.
7. Проведен расчет объемной несущей способности конструктивных схем плоских камер сгорания перспективных РПД с каналами регенеративного охлаждения оболочек. Даны рекомендации по проектированию и выбран рациональный вариант конструкции камеры.
8. Проведен анализ экспериментальных данных по испытаниям конструкций с однослойными и двухслойными взаимосвязанными оболочечными конструкциями, который позволил судить о правильности и точности разработанных автоматизированных методов расчетных исследований.

Разработано научно-методическое обеспечение САПР, основанное на применении новых автоматизированных методов, позволяющих оптимизировать габаритно-массовые характеристики трехмерных сложных конструкций ракетных двигателей. Разработка и исследование моделей, алгоритмов и методов для синтеза и анализа проектирования проектных решений, включая

конструкторские и технологические решения позволяют совершенствовать САПР и повысить качество реализации жизненного цикла проектирования-производства-эксплуатации изделия.

## **ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:**

### **Журналы из перечня ВАК:**

1. Абашев В.М., Ляшенко А.И. Метод последовательной оптимизации сложных конструкций// Научно-технический вестник Поволжья, №5, 2013.- с.86-89.
2. Широков И.Н., Ляшенко А.И. Использование программного комплекса ANSYS для создания экспериментальной установки, способной моделировать рабочий процесс в двухконтурной камере сгорания ракетно-прямоточного двигателя // Электронный журнал «Труды МАИ», №65 – 2013.
3. Ляшенко А.И., Матушкин А.А. Моделирование кинематических характеристик устройства доставки полезной нагрузки с учетом его упругих свойств// Научно-технический вестник Поволжья, №1, 2014.- с. 109-113.

### **Другие издания:**

1. Абашев В.М., Ляшенко А.И. Метод расчета объемной статической прочности сложных оболочечных конструкций// Материалы XIII Международной научно-практической конференции «Моделирование. Теория, методы и средства», г. Новочеркасск, 27 февраля 2013 г., Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск, ЮРГТУ (НПИ), 2013. – 5 с.
2. Ляшенко А.И. Оптимизация сложной оболочечной конструкции// Атмосферные энергетические установки, 2012, № 2. Изд-во ООО «Канон», с. 18-20.
3. Абашев В.М., Ляшенко А.И. Прочность камер жидкостных ракетных двигателей. Учебное пособие/ М., Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2014.- 116 с.

4. Ляшенко А.И. Метод расчета объемной общей несущей способности двухслойных связанных оболочек// Атмосферные энергетические установки, 2012, №3,4. Изд-во ООО «Канон», с. 38-40.
5. Ляшенко А.И. Объемная несущая способность конструкции жаровой трубы// Атмосферные энергетические установки, 2012, №3,4. Изд-во ООО «Канон», с. 57-62.
6. Ляшенко А.И. Общая объемная несущая способность плоской камеры сгорания// Атмосферные энергетические установки, 2012, №3,4. Изд-во ООО «Канон», с. 50-52
7. Абашев В.М., Еремкин И.В., Крайнев В.Л., Ляшенко А.И., Прудников А.Г., Тарасенко О.С., Третьяков П.К., Тупикин А.В. Газодинамическая камера-сопло// Тезисы докладов 12-й Международной конференции «Авиация и космонавтика-2013», 12-15 ноября 2013 г. Москва, СПб.; Мастерская печати, 2013.- с.301.
8. Абашев В.М., Животов Н.П., Ляшенко А.И., Киктев С.И., Хомовский Я.Н. Интегральное сопло// Тезисы докладов 12-й Международной конференции «Авиация и космонавтика-2013», 12-15 ноября 2013 г. Москва, СПб.; Мастерская печати, 2013.- с. 313-315.
9. Широков И.Н., Абашев В.М., Ляшенко А.И. Определение полноты сгорания в камере модельной установки при различных геометрических параметрах// Тезисы докладов 12-й Международной конференции «Авиация и космонавтика-2013», 12-15 ноября 2013 г. Москва, СПб.; Мастерская печати, 2013.- с. 427-428.
10. Абашев В.М., Ляшенко А.И. Выбор оптимальной схемы конструкции ракетного двигателя твердого топлива с помощью экспертной системы «РЫСЬ»// Материалы XIII Международной научно-практической конференции «Моделирование. Теория, методы и средства», г. Новочеркасск, 27 февраля 2013 г., Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск, ЮРГТУ (НПИ), 2013. – 5 с.