

На правах рукописи



БУРНЫШЕВА Татьяна Витальевна

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОЛОГИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ РАСЧЕТЕ И ДИАГНОСТИКЕ АНИЗОГРИДНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

05.07.03 - прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск 2015

Работа выполнена в Новокузнецком институте (филиале)
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Кемеровский государственный университет».

Научный консультант: доктор технических наук,
профессор **Каледин Валерий Олегович**

Официальные оппоненты: **Корнеев Сергей Александрович**,
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Омский государственный технический университет»,
заведующий кафедрой «Сопротивление материалов»

Железнов Лев Петрович,
доктор технических наук, старший научный сотрудник,
общество с ограниченной ответственностью «Транс-ИТ»,
Новосибирский филиал, начальник отдела разработок
систем Охраны труда

Корнев Владимир Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева
Сибирского отделения Российской академии наук,
главный научный сотрудник отдела механики
деформируемого твердого тела

Ведущая организация: Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«Московский Государственный Технический
Университет имени Н.Э. Баумана»**, г. Москва

Защита диссертации состоится « 19 » ноября 2015 г. в 13-00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.173.13 в Новосибирском государственном
техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Новосибирского
государственного технического университета

http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=15161

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



Тюрин Андрей Геннадиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В конструкциях современных космических летательных аппаратов (КЛА) находят расширяющееся применение анизотридные сетчатые конструкции из композиционных материалов, изготавливаемые методом непрерывной намотки. Основным классификационным признаком сетчатой конструкции является наличие нескольких семейств пересекающихся ребер, которые образуют регулярную структуру. Анизотридные конструкции используются либо как самостоятельные конструктивные элементы, соединяющие различные агрегаты (например, выводимый аппарат с носителем), либо совместно с обшивкой, обеспечивая сплошную поверхность для герметизации или ограждения агрегатов от воздействия потока воздуха. Наличие вырезов и подкрепляющих элементов приводит к существенному различию топологии конструктивно-силовых схем анизотридных конструкций в различных изделиях, что существенно затрудняет и усложняет решение задач по обеспечению прочности реальных КЛА.

Проектирование каждой конкретной сетчатой конструкции, по сравнению с традиционными тонкостенными, в меньшей степени позволяет опираться на типовые решения и требует более трудоемкого расчета напряженно-деформированного состояния всей конструкции с использованием численных методов и комплексов программ для обеспечения прочности изделия. Методы расчета оболочек регулярной структуры в настоящее время наиболее разработаны и позволяют производить проектирование и оптимизацию по прочности, жесткости и устойчивости. В то же время нарушение регулярности (такое, как наличие вырезов) может быть учтено только в рамках дискретного моделирования конструкции с заданной топологией и геометрией, и для обеспечения прочности необходим многократный расчет семейств однотипных конструкций, например, методом конечных элементов. В связи с высокой трудоемкостью и продолжительностью такого расчета необходима разработка усовершенствованных методов и математических моделей, сохраняющих достоинства дискретного моделирования и в то же время позволяющих целенаправленно получать достаточно полные данные о напряжениях и деформациях при варьировании проектных параметров. Использование таких методов и моделей позволит решать задачи, связанные с обеспечением прочности сетчатых конструкций летательных аппаратов на всех стадиях их жизненного цикла: рационального проектирования, оценки фактических параметров прочности и жесткости при доводке опытных конструкций, а также диагностики фактической прочности и жесткости при неразрушающих испытаниях серийных конструкций.

Степень разработанности темы исследования

Основополагающий вклад в разработку сетчатых композиционных конструкций внесла школа В.В. Васильева. Известны аналитические оценки напряжений регулярной реберной структуры сетчатой оболочки, полученные В.В. Васильевым и В.А. Бунаковым при использовании вариационного принципа и безмоментной теории с учетом замены реберной структуры условно сплошным

слоем с осредненной жесткостью. Континуальное описание деформирования сетчатой оболочки было усовершенствовано В.А. Бунаковым в 1992 году путем учета моментных эффектов в ребрах. Однако континуальная модель не вполне адекватна реальной сетчатой структуре вблизи кромок и нарушений регулярности, и в этих случаях необходимо использовать дискретные модели.

Дискретный подход к моделированию сетчатых анизотридных конструкций использовали В.В. Васильев, А.Ф. Разин, А.А. Бабичев, В.П. Булдаков, М.В. Никитин и др. в целях оценки эффективности типов механических соединений сетчатых композитных конструкций, исследования влияния формы ячейки сетчатой структуры на напряженное состояние композитной сетчатой оболочки при локальном нагружении. Существующие универсальные методы позволяют рассчитать статическое напряженно-деформированное состояние, устойчивость и колебания сетчатых конструкций. Исследования сетчатого адаптера (без обшивки) на устойчивость с использованием дискретного моделирования проводили Морозов Е.В., Лопатин А.В., Нестеров В.А.

Известны примеры использования дискретных моделей при проектировании сетчатых конструкций летательных аппаратов. Так, задача о рациональном проектировании окантовок люков решалась А.Ф. Разиным и Вл. О. Калединым численно, методом конечных элементов. В качестве критерия рациональности окантовки выбрано условие минимума коэффициента концентрации напряжений в спиральных ребрах конструкции. Метод конечных элементов применялся В.П. Полиновским при выборе оптимальных параметров композитных сетчатых отсеков по критерию минимума массы конструкции. Морозовым Е.В., Лопатиным А.В. и Нестеровым В.А. были получены зависимости массы сетчатой цилиндрической реберной структуры от угла наклона спирального ребра к образующей и длины отсека.

Таким образом, в настоящее время достаточно разработаны методы дискретного конечно-элементного моделирования конструкций, однако при проведении многовариантных расчетов на этапе предпроектных исследований и проектирования они требуют весьма трудоемких и продолжительных расчетов. С другой стороны, известны подходы к сокращению числа вариантов расчета, основанные на методах планирования эксперимента. Однако к расчетам сетчатых оболочек они совместно не применялись, вследствие чего отсутствует единая методология целенаправленного исследования прочности анизотридных конструкций на основе вычислительного эксперимента. Это делает актуальной разработку методов и алгоритмов решения задач, связанных с обеспечением прочности композитных сетчатых оболочечных конструкций КЛА, на основе единой идеологии вычислительного эксперимента.

Цель работы заключается в разработке методологии вычислительного эксперимента применительно к задачам рационального проектирования, поверочного расчета и технической диагностики анизотридных конструкций агрегатов КЛА.

Для достижения этой цели в работе поставлены следующие **задачи**.

- 1 Разработка и обоснование многофакторных математических моделей статического деформирования сетчатых оболочек из композиционных материалов на основе расчетной схемы пространственной рамы, обеспечивающих совместное деформирование реберной структуры, обшивки и усилений (окантовок вырезов).
- 2 Разработка численных алгоритмов определения напряженно-деформированного состояния сетчатых конструкций КЛА регулярной и нерегулярной структуры, выполненных из композиционных материалов, под действием квазистатической нагрузки, и получение аналитических оценок для конструкций регулярной структуры.
- 3 Разработка программного обеспечения для вычислительного эксперимента с использованием разработанных математических моделей статического деформирования сетчатых конструкций из композиционных материалов.
- 4 Исследование методами вычислительного эксперимента закономерностей линейного деформирования и устойчивости нерегулярных сетчатых конструкций отсеков КЛА с вырезами и местными усилениями при статических нагрузках.
- 5 Разработка метода рационального проектирования сетчатых конструкций КЛА нерегулярной структуры, выполненных из композиционных материалов, на основе методологии вычислительного эксперимента.
- 6 Разработка метода интерпретации данных натурных испытаний агрегатов КЛА на основе идентификации математических моделей деформирования и разрушения сетчатых конструкций регулярной и нерегулярной структуры из композиционных материалов.
- 7 Практическая апробация разработанных методов, алгоритмов и программ при рациональном проектировании, опытной отработке и технической диагностике сетчатых конструкций агрегатов летательных аппаратов, выполненных из композиционных материалов.

Научная новизна работы

1 Построено семейство многофакторных математических моделей статического деформирования анизотридных конструкций агрегатов КЛА, содержащих систему ребер с обшивкой или без неё, в которых система ребер описывается как пространственная рама, при наличии обшивки учитывается её совместное деформирование с ребрами, а при наличии вырезов – совместное деформирование ребер, обшивки и окантовки вырезов.

2 Доказана необходимость полного дискретного моделирования при расчете напряженно-деформированного состояния агрегатов КЛА, выполненных по конструктивно-силовой схеме анизотридной оболочки, поскольку известные континуальные модели приводят к завышению рассчитанных напряжений в обшивке и ребрах вблизи вырезов в анизотридной конструкции в 2,7 раза и более при увеличении числа спиральных ребер в 4 раза при неизменной массе.

3 Получены аппроксимирующие аналитические зависимости перемещений, напряжений и деформаций от вариации конструктивных параметров анизотридной оболочки регулярной структуры при осевом сжатии, которые могут использоваться для расчета напряженно-деформированного состояния сетчатых

отсеков КЛА без учета вырезов в расчетном случае полета с максимальной продольной перегрузкой.

4 Разработаны новые алгоритмы рационального проектирования сложных нерегулярных сетчатых конструкций летательных аппаратов по критерию статической прочности, использующие многофакторный вычислительный эксперимент и редуцирование конечно-элементной модели.

5 Разработаны новые постановки задач и алгоритмы идентификации фактических прочностных и жесткостных характеристик сетчатых конструкций по данным натурных испытаний, основанные на применении вычислительного эксперимента и разработанного программного обеспечения.

6 Разработаны новые постановки задач и алгоритмы идентификации фактических нагрузок при натурных испытаниях конструкций летательных аппаратов, содержащих отсеки сетчатой структуры.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается:

- в разработанных методах и алгоритмах рационального проектирования сложных нерегулярных сетчатых конструкций летательных аппаратов по критерию статической прочности с использованием многофакторного вычислительного эксперимента и редуцирования конечно-элементной модели;

- в разработанных методах и алгоритмах идентификации фактических прочностных и жесткостных характеристик сетчатых конструкций по данным натурных испытаний, основанных на применении вычислительного эксперимента и разработанного программного обеспечения;

- в разработанных методах и алгоритмах идентификации нагрузок, фактически реализующихся при натурных испытаниях конструкций летательных аппаратов, содержащих отсеки сетчатой структуры;

- в возможности применять разработанные методы, алгоритмы и созданный программный комплекс для рационального проектирования, опытной отработки и технической диагностики сетчатых конструкций нерегулярной структуры, выполненных из композиционных материалов по силовой схеме оболочек сетчатой структуры.

Результаты работы внедрены:

- в ОАО «ЦНИИСМ» - разработанные методы решения задач рационального проектирования и интерпретации данных натурных испытаний;

- в учебном процессе НФИ КемГУ – в качестве разделов учебных курсов бакалавров и магистров направления «Прикладная математика и информатика»;

- в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах НФИ КемГУ: при выполнении государственных контрактов №4546, 12-05/3-13, 12-05/8-14; гранта РФФИ № 06-01-00004-А; хозяйственной научно-исследовательской работы «Разработка методики, алгоритмов и программного обеспечения для уточненных прочностных и тепловых расчетов оболочечных конструкций из композиционных материалов» по договору № 64п с ОАО «ЦНИИСМ», «Параметрические исследования прочности и жесткости многослойных оболочечных конструкций из полимерных композиционных материалов с

силовым набором» по договору № 32к с ОАО «ЦНИИСМ» и «Проведение расчетов и разработка рекомендаций по конструктивному оформлению зон концентрации» по договору № 12-05.22 с ЗАО «ИСТРАН», г. Москва.

Методология и методы исследования

Методы исследования основаны на использовании: метода конечных элементов для решения краевых задач теории упругости и строительной механики, методов вычислительного эксперимента, методов математической статистики для обработки экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту

1. Многофакторные математические модели статического деформирования анизотридных конструкций агрегатов КЛА регулярной и нерегулярной структуры, основанные на классе расчетных схем типа пространственной рамы, в которых обшивка и система ребер деформируются совместно, учитываются конструктивные вырезы и окантовки, а параметры прочности и жесткости могут быть переменными по длине ребер.

2. Аналитические оценки параметров напряженно-деформированного состояния сетчатых цилиндрических оболочек регулярной структуры как с обшивкой, так и без обшивки, при осевом сжатии, на основе расчетной схемы пространственной рамы.

3. Алгоритмы редуцирования конечно-элементной модели сетчатой конструкции типа пространственной рамы регулярной и нерегулярной структуры, основанные на многофакторном вычислительном эксперименте, для получения аппроксимирующих аналитических зависимостей перемещений, напряжений и деформаций элементов сетчатой конструкции от вариации конструктивных параметров.

4. Специализированный комплекс программ «Композит НК Анизотрид» для многофакторного вычислительного эксперимента по определению напряжений, деформаций и критических нагрузок потери устойчивости при проектных и фактических нагрузках КЛА.

5. Алгоритмы рационального проектирования сложных нерегулярных сетчатых конструкций летательных аппаратов по критерию статической прочности, использующие многофакторный вычислительный эксперимент и редуцирование конечно-элементной модели.

6. Постановки задач и алгоритмы идентификации фактических условий нагружения, прочностных и жесткостных характеристик сетчатых конструкций по данным натурных испытаний, основанные на применении вычислительного эксперимента и разработанного программного обеспечения, для расчетно-экспериментального обеспечения статической прочности анизотридных конструкций космических летательных аппаратов.

7. Применимость разработанных методов, алгоритмов и программ при рациональном проектировании, опытной отработке и технической диагностике конструкций агрегатов летательных аппаратов, выполненных из композиционных материалов по силовой схеме оболочек сетчатой структуры.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов обеспечивается корректным применением апробированных теоретических положений, использованием проверенных численных математических методов и алгоритмов, и подтверждается согласием результатов расчета по методам и алгоритмам, предложенным в диссертационной работе, с результатами натурных измерений параметров напряженно-деформированного состояния.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на 8-ой, 9-ой, 10-ой, 12-ой Всероссийской научной конференции «Краевые задачи и математическое моделирование» (г. Новокузнецк, 2006 г., 2008 г., 2010 г., 2014 г.); I, II и III Всероссийской конференции «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций» (г. Новосибирск, 2006, 2011, 2014 г.); VI Международной научно-практической конференции (г. Новочеркасск, 2006 г.); XXVI Российской школе по проблемам науки и технологий (г. Екатеринбург, 2006 г.); XV, XVI, XVII Международной конференции по механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2007, ВМСППС'2009, ВМСППС'2011 г. Алушта); VI Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные недра Кузбасса. IT - технологии» (г. Кемерово, 2007 г.); 5-й Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 2008 г.); на XIV, XV Международной научной конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (г. Красноярск, 2010 г., 2011 г.); на IX, X Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (г. Нижний Новгород, 2010 г., 2011 г.); на XXII, XXIII Всероссийской конференции «Численные методы решения задач упругости и пластичности» (г. Барнаул, 2011 г., 2013 г.).

Личный вклад автора заключается в формулировке цели и идеи исследования, определении его программы, построении усовершенствованных дискретных математических моделей отсеков летательных аппаратов, математической формулировке задач для проектировочных и идентификационных расчетов, проведении вычислительных экспериментов по исследованию конструкций отсеков летательных аппаратов. Под руководством и при непосредственном участии автора разработано программное обеспечение для расчетов фактических жесткостных параметров отсеков летательных аппаратов по данным натурных испытаний и идентификации фактических условий нагружения. Отдельные расчеты проведены совместно с соавторами по публикациям, приведенным в автореферате.

Доля личного участия автора составляет: в постановке задач исследования, в выборе методов их решения - 100 %, в разработке многофакторных моделей статического деформирования сетчатых оболочек из композиционных материалов на основе расчетной схемы пространственной рамы – 80%, в проведении численных экспериментов – 80%, в анализе и обобщении полученных результатов - 100%, в формулировке выводов и положений, выносимых на защиту – 100%, в разработке и реализации программного обеспечения – 25%, во внедрении

результатов – 25%. Соавторы не возражают против использования совместных результатов в диссертации.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 37 печатных работах, в том числе 14 - в журналах из Перечня ВАК. На разработанные компьютерные программы получены свидетельства о государственной регистрации № 2010611370 и № 2014613344.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, библиографического списка из 244 наименований и 10 приложений; Объем основной части работы составляет 325 страниц и включает 169 рисунков и 19 таблиц. Общий объем диссертации 401 страница.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации; представлены основные концепции работы, определяющие её основную новизну и практическую значимость; сформулирована цель, задачи работы и выносимые на защиту положения; приведены сведения об апробации работы и краткое содержание работы по главам.

В первой главе представлен обзор основных методов и результатов исследования на прочность и устойчивость сетчатых композиционных оболочек.

Отмечено, что потенциально высокие прочностные свойства композитов наиболее полно реализуются в конструкциях летательных аппаратов, если удастся обеспечить равнонапряженность армирующих волокон. Это в значительной степени достигается на основе предложенного В.Е. Гайдачуком принципа дифференциального проектирования некоторых классов конструкций планера самолета. Наиболее полно удалось обеспечить равнонапряженность для баллонов высокого давления (И.Ф. Образцов, В.В. Васильев и В.А. Бунаков). Третьим классом конструкций, в которых удастся обеспечить равнонапряженность, являются сетчатые конструкции (Russian anisogrid), основополагающий вклад в разработку которых внесла школа В.В. Васильева.

В сетчатых оболочках, являющихся структурными элементами конструкций летательных аппаратов, присутствуют вырезы, либо некомпенсированные, либо усиленные окантовками (рисунок 1), которые нарушают равнонапряженность реберной структуры.

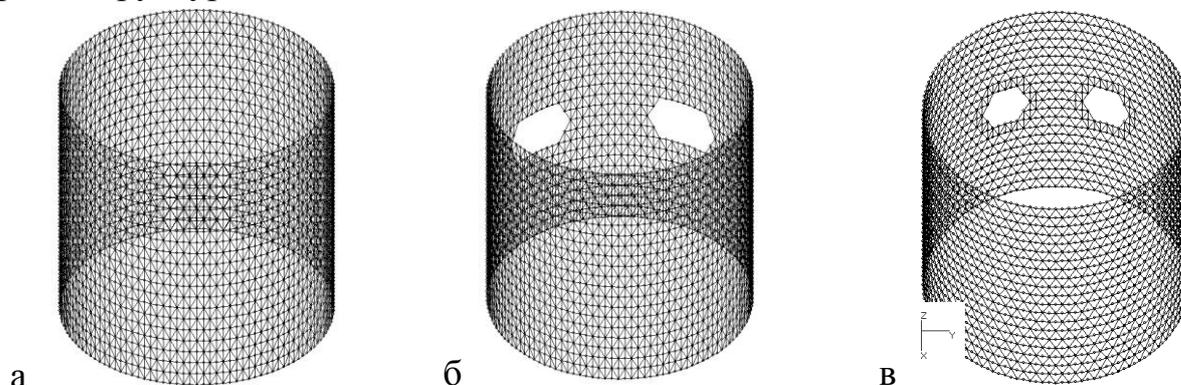


Рисунок 1 – Структурные модели цилиндрических оболочечных конструкций:
а - без вырезов; б - с некомпенсированными вырезами;
в - с усиленными вырезами

Это приводит к необходимости использования численных методов и комплексов программ для обеспечения статической прочности. Отмечена актуальность применения этих методов как при проектировании и поверочном расчете, так и при интерпретации данных натурных испытаний.

Задачи о статическом деформировании сетчатых оболочек основываются на континуальном и дискретном представлении конструкции. Наиболее значимые теоретические результаты для регулярных сетчатых структур получены В.В. Васильевым в рамках континуального подхода с применением безмоментной теории. Описание деформирования сетчатой оболочки было усовершенствовано В.А. Бунаковым путем учета моментных эффектов в ребрах. Важные теоретические и прикладные результаты получены в работах В.В. Васильева, А.Ф. Разина, А.В. Азарова, В.И. Халимановича, А.А. Бабичева, В.П. Булдакова и др.

Расчет напряженно-деформированного состояния сетчатой конструкции, содержащей вырезы и усиления, как правило, выполняется с применением дискретного подхода. Известны исследования влияния формы ячейки сетчатой структуры на напряженное состояние композитной сетчатой оболочки при локальном нагружении (В.В. Васильев, М.В. Никитин, А.Ф. Разин); решение задачи о рациональном проектировании окантовок люков композитных сетчатых оболочек (А.Ф. Разин и Вл. О. Каледин); оптимизация конструкции по критерию минимума массы (В.П. Полиновский) и др.

Вместе с тем, отмечено отсутствие общей методики моделирования и исследования сетчатых конструкций с нарушением регулярности реберной структуры на прочность при статическом нагружении, основанной на совместном использовании дискретных моделей и методов вычислительного эксперимента. Недостаточно исследован вопрос о совместности деформирования обшивки и ребер.

Важным аспектом решения прикладных задач является программное обеспечение. В известных работах использовались отечественные и зарубежные программные комплексы: *ANSYS*, *DesignSpace*, *NASTRAN*, «Космос», *SCAD*, ЛИРА, АМП *WinMachine*, «Композит-НК». В решении исследовательских задач требуется опережающая разработка программного обеспечения, что делает необходимым применение программ с открытым кодом.

На основе выполненного аналитического обзора формулируется цель и ставятся задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** представлена методика многофакторного дискретного моделирования сетчатых оболочечных конструкций летательных аппаратов.

Для построения моделей сетчатых оболочек каждый конструктивный элемент задается соответствующим набором конечных элементов: спиральные, кольцевые ребра и шпангоуты представлены в виде балок; обшивка в виде треугольных пластин.

Поле перемещений сетчатой оболочки предполагается непрерывным. За поверхность приведения выбрана поверхность контакта ребер с обшивкой (рисунок 2, б). В узлах поверхности приведения задаются оси главной системы координат (s' , t' , n'), ось s' направлена по касательной к оболочке, ось t' - по

образующей от задней кромки оболочки к передней, ось n' – по внешней нормали. К главной системе будем относить перемещения и внешние силы.

Для обеспечения совместности перемещений вводится вспомогательная цилиндрическая система координат (z, φ, r) , где ось z совпадает с осью оболочки (рисунок 2, а), угол φ отсчитывается от произвольно выбранной образующей, ось r направлена по внешней нормали к поверхности приведения.

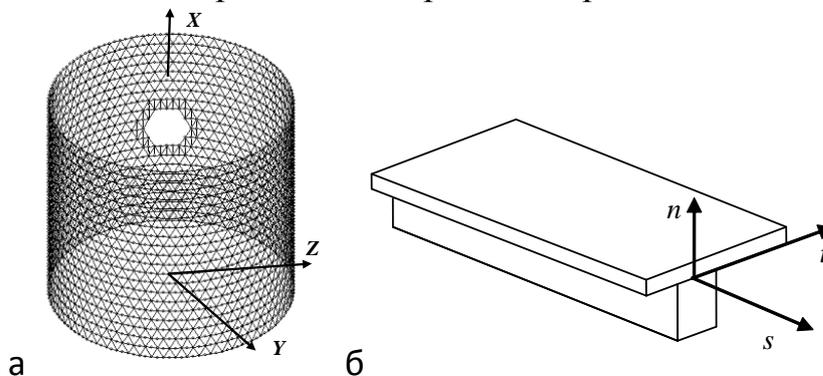


Рисунок 2 – Модель сетчатой цилиндрической конструкции:
а – усиление выреза, б– поверхность приведения

Каждая точка конструкции может быть определена координатами (z, φ, n) , причем координата n на поверхности приведения равна нулю. Перемещения точек поверхности приведения определим через u, v, w , где u – перемещения вдоль оси s' ; v, w – перемещения вдоль осей t', n' соответственно. Линейные перемещения поверхности приведения вдоль осей (s', t', n') являются функциями двух координат:

$$u_s = u_s(z, \varphi), u_t = u_t(z, \varphi), u_n = u_n(z, \varphi). \quad (1)$$

Каждый конструктивный элемент анизотридной конструкции задется соответствующим конечным элементом: спиральные, кольцевые ребра и шпангоуты в виде балок; обшивка в виде треугольных пластин. Для каждого типа конечного элемента выбирается местная система координат (s, t, n) , начало которой находится в точке проекции центра элемента на поверхность приведения. Ось n направлена по внешней нормали к поверхности оболочки, оси t и s выбираются так, чтобы образовалась правая тройка векторов $(\vec{n} = \vec{s} \times \vec{t})$, в соответствии с типом элемента.

На поверхности приведения перемещения в ребрах в местной системе координат, с учетом $n=0$ и углов поворотов сечений ребер θ_s, θ_n принимают вид:

$$u^{pe\delta}(s, t, n) = u_s - t\theta_n, v^{pe\delta}(s, t, n) = u_t, w^{pe\delta}(s, t, n) = w^{обш}(s, t, n), \quad (2)$$

а на линиях приведения при $t=0$ совпадают с перемещениями в обшивке. Данное поле перемещений описывает деформирование только системы ребер и является непрерывным в пределах ребер. Оно не относится к точкам, расположенным между ребрами.

Перемещения обшивки в местной системе координат имеют вид:

$$u^{обш}(s, t, n) = u_s - \theta'_s n, v^{обш}(s, t, n) = u_t - \theta'_t n, w^{обш}(s, t, n) = u_n, \quad (3)$$

где $\theta'_s = \frac{\partial u_n}{\partial s}$, $\theta'_t = \frac{\partial u_n}{\partial t}$ - углы поворота нормали в пределах обшивки вокруг осей s' и t' соответственно и зависят только от z и φ .

При $n=0$ перемещения в обшивке совпадают с функциями линейных перемещений поверхности приведения в главной системе координат:

$$u^{обш}(s,t,n)=u(s',t',n')=u_s, v^{обш}(s,t,n)=v(s',t',n')=u_t, w^{обш}(s,t,n)=w(s',t',n')=u_n. \quad (4)$$

В результате на поверхности приведения обшивки перемещения те же, что и на линиях приведения для ребер.

Таким образом, поле перемещений сетчатой конструкции однозначно определяется восьмью функциями двух координат z и φ :

$$u_s(z, \varphi), u_t(z, \varphi), u_n(z, \varphi), \theta_s(z, \varphi), \theta_t(z, \varphi), \theta_n(z, \varphi), \theta'_s(z, \varphi), \theta'_t(z, \varphi). \quad (5)$$

Построены базисные функции, обеспечивающие совместность перемещений ребер и обшивки в узлах на поверхности приведения.

Построенная модель обладает следующими свойствами:

- 1) перемещения ребер и обшивки совпадают на линиях поверхности приведения, проходящих параллельно осям ребер (линиях приведения для ребер);
- 2) деформирование обшивки соответствует классической гипотезе Кирхгофа-Лява;
- 3) каждое ребро представляется в виде набора коротких балок, для которых принята гипотеза Тимошенко;
- 4) перемещения спиральных и кольцевых ребер в местах их пересечения непрерывны;
- 5) напряжения, действующие вдоль нормали к поверхности приведения, равны нулю.

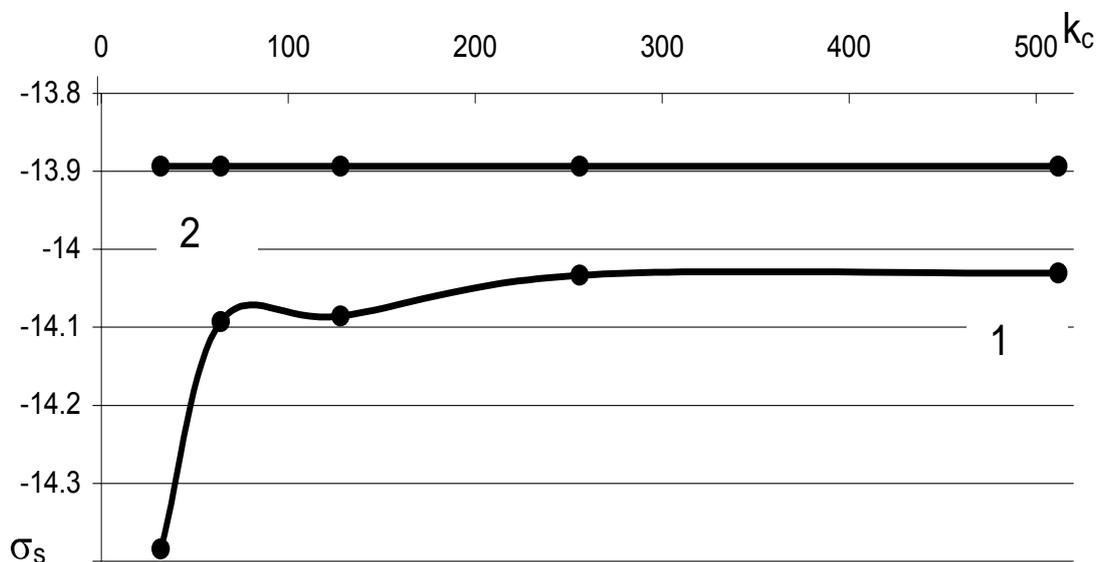
Основным видом нагружения сетчатых конструкций является внецентренное сжатие вдоль оси оболочки. Рассмотрено равномерное или неравномерное распределение погонной нагрузки на верхней кромке, а также приложение сосредоточенной силы и моментов к «жесткому» сечению.

Расчет напряженно-деформированного состояния сетчатой оболочечной конструкции выполняется методом конечных элементов в вариационной постановке по принципу Лагранжа. Варьируемыми переменными являются узловые значения функций, определяющих перемещения, на поверхности приведения. В обшивке перемещения аппроксимируются неполным кубическим многочленом (элемент Зенкевича-Аргириса), в элементах ребер – одномерным эрмитовым многочленом 3-го порядка.

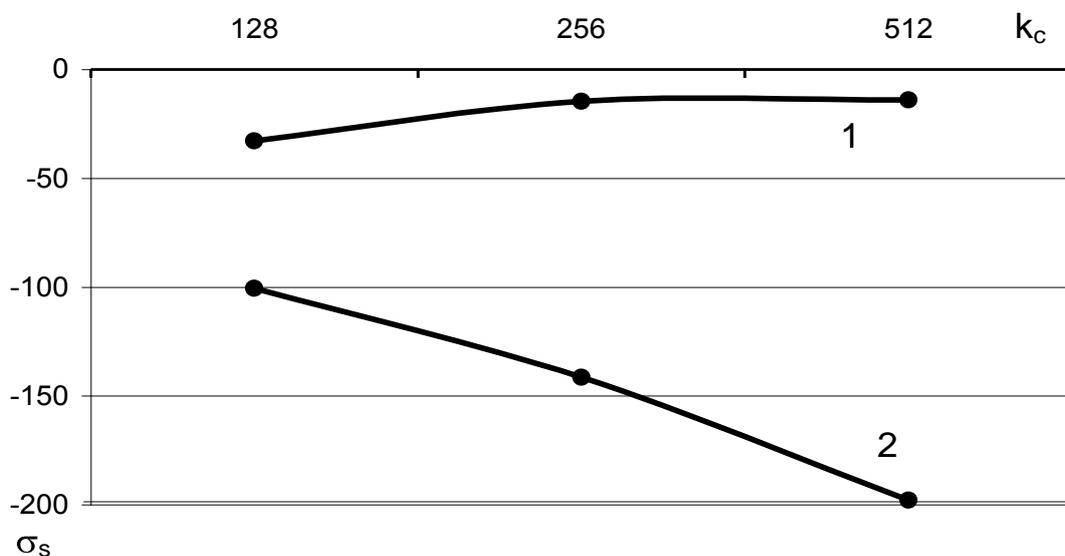
Таким образом, построена дискретная модель статического деформирования сетчатой оболочки регулярной и нерегулярной структуры, обеспечивающая совместность деформирования элементов обшивки и ребер на их линиях приведения. Как частный случай, модель описывает статическое деформирование сетчатой конструкции без обшивки.

Разработанная дискретная модель хорошо согласуется с известными континуальными моделями эквивалентной оболочки при регулярной структуре конструкции (рисунок 3, а). В то же время для оболочек с вырезами

континуальная модель дает высокую погрешность напряжений в углах вырезов сетчатой конструкции (рисунок 3, б). Это связано с тем, что вырез, соизмеримый с расстоянием между ребрами, нарушает одну из предпосылок применения континуальной модели: в окрестность выреза попадает малое число ребер, что связано с существенностью изгибных эффектов в ребрах.



а)



б)

Рисунок 3 – Напряжения σ_s в спиральных ребрах сетчатой структуры конструкции: а) без вырезов; б) с некомпенсированным вырезом, 1 – при дискретном моделировании, 2 – при континуальном подходе

Таким образом, показано, что дискретный подход необходим при расчете напряжений в сетчатых оболочечных конструкциях с вырезами, соизмеримыми с размерами структурных ячеек.

Одним из ограничений, учитываемых при проектировании сетчатых конструкций летательных аппаратов, является лимитирование критических

нагрузок по местной и общей устойчивости. Для оценки критических нагрузок на основе разработанной модели функционал потенциальной энергии известным образом представлен в дискретном виде, как функция приращений узловых переменных δ^* , матрицы жесткости K и матрицы геометрической жесткости G . Задача определения критических нагрузок сводится к обобщенной проблеме собственных чисел пары глобальных матриц (жесткости и геометрической жесткости):

$$(K + \lambda G)\Delta^* = 0. \quad (6)$$

Для вычисления собственных значений и соответствующих им собственных векторов использовался метод итераций в подпространстве, реализованный в программном комплексе «Композит-НК».

Изложенные выше соотношения позволяют проводить поверочные расчеты сетчатых оболочек. Однако получаемые при этом результаты путем надлежащей систематизации на основе единой идеологии вычислительного эксперимента позволяют построить алгоритмы решения ряда более сложных задач по обеспечению статической прочности сетчатых оболочек на всех этапах жизненного цикла конструкции.

Формально математическую модель композиционной сетчатой оболочечной конструкции представим в виде:

$$\chi = \Psi(\rho)\check{r}, \quad (7)$$

где χ – вектор переменных состояния (перемещений, напряжений и деформаций);

\check{r} – вектор переменных воздействий (приложенные силы);

Ψ – оператор модели, который отображает элементы пространства воздействий на элементы пространства состояний;

ρ – вектор параметров модели, включающий «внутренние» характеристики моделируемого объекта (физико-механические константы материалов, геометрические размеры конструкции, размеры сечений конструктивных элементов и т.п.).

Это представление уровня «черного ящика» позволяет поставить задачи параметрического исследования, рационального проектирования, оптимизации и идентификации.

На ранних стадиях проектирования проводится оптимизация конструкции по массе, которую можно сформулировать следующим образом.

Известно: начальные значения структурных параметров модели $X_0 \in \rho$, вектор переменных воздействий \check{r} , модель реакции конструкции на воздействия $\chi = \Psi(\rho)\check{r}$.

Требуется определить: структурные параметры модели $X \subseteq \rho$, при которых выполняются ограничения структурных параметров $\tilde{F}(\rho) \geq 0$ и ограничения параметров состояния $\Phi(\chi) \geq 0$, обеспечивающие минимум целевой функции – массы конструкции: $M(\rho) \rightarrow \min$.

Задача рационального проектирования конструкции заключается в определении значений структурных параметров модели, которые удовлетворяют

изначально заданным ограничениям, без условия минимума критерия оптимизации. Для сетчатых оболочек в качестве ограничений структурных параметров рассматривают габариты конструкции, заданное число спиральных и/или кольцевых ребер и т.д., а также ограничения по прочности, жесткости и устойчивости.

Известно: начальные значения структурных параметров модели $X_0 \in \rho$, вектор переменных воздействий \check{r} , модель реакции конструкции на воздействия $\chi = \Psi(\rho)\check{r}$.

Требуется определить: структурные параметры модели $X \subseteq \rho$, при которых выполняются ограничения структурных параметров конструкции $\tilde{F}(\rho) \geq 0$ и параметров состояния $\Phi(\chi) \geq 0$.

При производстве ответственных конструкций летательных аппаратов актуальна задача диагностики – определение степени соответствия конструкции поставленным техническим условиям по данным неразрушающих и разрушающих натуральных испытаний. По своей постановке задача диагностики относится к задачам идентификации. Интерпретация данных натуральных испытаний связана с двумя задачами: идентификация фактических параметров прочности и жесткости конструкции и идентификация параметров нагружения.

Постановка задачи определения фактических структурных параметров объекта будет иметь следующий вид.

Известно: начальный (априорно заданный) вектор структурных параметров модели ρ , вектор переменных воздействий \check{r} , модель реакции конструкции на воздействия $\chi = \Psi(\rho)\check{r}$, данные натурального эксперимента $Q \Leftarrow \chi$.

Требуется определить: структурные параметры модели $X \subseteq \rho$, при которых выполняются условия ограничения на отклик модели $\tilde{F}(\rho) \geq 0$ и обеспечивается минимум критерия качества идентификации $\Psi = \|\chi - Q'\| \rightarrow \min$, где Q' – данные натурального эксперимента.

Задача идентификации фактических нагрузок может быть сформулирована следующим образом.

Известно: вектор структурных параметров модели ρ , априорно заданный вектор переменных воздействий \check{r} , модель реакции конструкции на воздействия $\chi = \Psi(\rho)\check{r}$, данные натурального эксперимента $Q \Leftarrow \chi$.

Требуется определить: параметры вектора нагрузок $\tilde{R} \subseteq \check{r}$, при которых выполняются ограничения на параметры нагрузок $\tilde{F}(\check{r}) \geq 0$ и обеспечивается минимум критерия качества идентификации $\Psi = \|\chi - Q'\| \rightarrow \min$, где Q' – данные натурального эксперимента.

Решение сформулированных задач требует трудоемких и продолжительных расчетов на компьютере многих вариантов при различных сочетаниях значений параметров модели, что затрудняет использование дискретного моделирования в качестве универсального инструмента расчета рассматриваемого класса оболочек. Для повышения экономичности расчета и получения достаточно полной информации из ограниченного числа вариантов расчета предлагается использовать методы планирования вычислительного эксперимента и построение

аппроксимирующих зависимостей. Тогда на каждой итерации решения поставленных выше задач возможно заменить конечно-элементное моделирование аппроксимацией результатов факторных вычислительных экспериментов, которые проводятся заранее.

Принципиальная схема алгоритма решения частных задач обеспечения статической прочности сетчатых конструкций с применением методов вычислительного эксперимента представлена на рисунке 4.

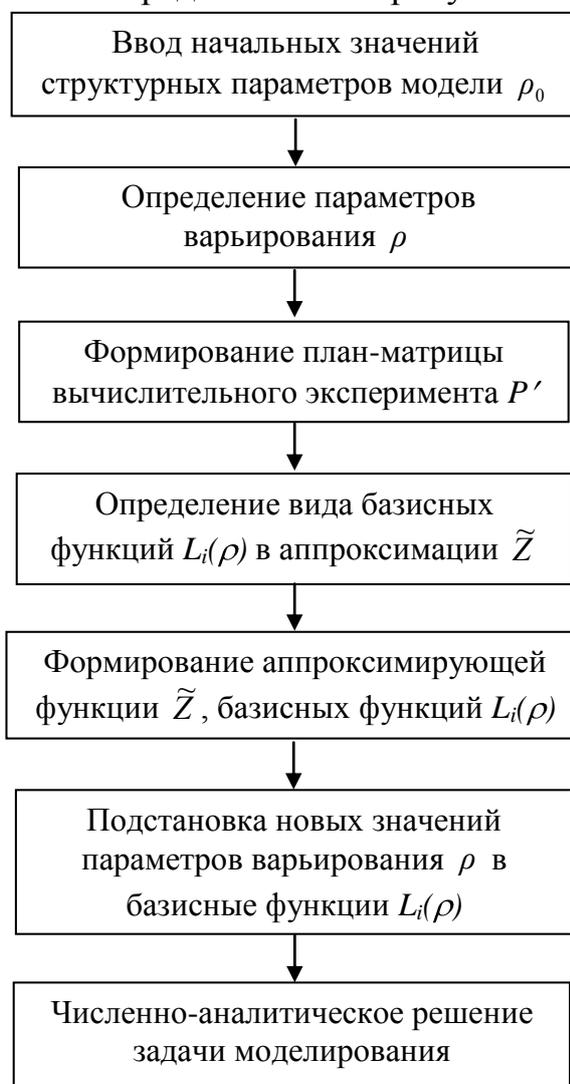


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма решения частных задач обеспечения статической прочности сетчатых конструкций с применением методов вычислительного эксперимента

Методика факторного вычислительного эксперимента при дискретном моделировании сетчатых конструкций регулярной и нерегулярной структуры реализована автором в усовершенствованной версии комплекса прикладных программ «Композит-НК». Тем самым разработано программное обеспечение проектировочных и идентификационных расчетов крупногабаритных сетчатых конструкций агрегатов летательных аппаратов из композиционных материалов при действии статических и квазистатических нагрузок.

В третьей главе разработанная математическая модель применена к оценке напряженно-деформированного состояния сетчатых оболочек без вырезов. Результаты сопоставляются с аналитическими оценками, полученными с учетом изгиба ребер конструкции.

Рассматривалась плоская неограниченная двоякопериодическая система горизонтальных и диагональных ребер, нагруженная вдоль вертикали. Из условия равновесия элементарной ромбической ячейки были получены аналитические оценки средних напряжений в реберной структуре. Оценка изгибных напряжений в ребрах уточнялась с учетом того, что соединения ребер являются жесткими, а не шарнирными.

Получены верхние оценки изгибающих моментов в спиральных ребрах в касательной плоскости и кольцевых ребер – в плоскости окружности оболочки.

В аналитических оценках все параметры напряженно-деформированного состояния сетчатой конструкции выражаются через условное напряжение σ_0 , равное отношению сжимающей силы к суммарной площади сечений спиральных ребер. В таблице 1 приведены некоторые из полученных оценок при $\sigma_0 = 1$.

Напряжения в структурных элементах сетчатой оболочки с учетом обшивки при осевом сжатии

Таблица 1

Вид напряжения	Аналитическая формула
Напряжение в спиральном ребре	$\sigma_c = E_c (\varepsilon_s \cos^2 \alpha + \varepsilon_k \sin^2 \alpha)$
Напряжение в кольцевом ребре	$\sigma_k = E_k \varepsilon_k$
Максимальное напряжение изгиба в спиральных ребрах	$\sigma_c^{изг} = \frac{E_c B_c}{2} \cdot \frac{l_c - 2l}{l_c^2} 6(\varepsilon_s - \varepsilon_k) \sin \alpha \cos \alpha$
Максимальное напряжение изгиба в кольцевых ребрах	$\sigma_k^{изг} = \frac{2E_k \varepsilon_k l_c^2 \sin^2 \alpha}{Rh_k}$
Продольные напряжения в обшивке	$\sigma_s^{обш} = \frac{E_s \varepsilon_s + \nu_{sk} E_k \varepsilon_k}{1 - \nu_{sk} \nu_{ks}}$
Окружные напряжения в обшивке	$\sigma_k^{обш} = \frac{\nu_{ks} E_s \varepsilon_s + E_k \varepsilon_k}{1 - \nu_{sk} \nu_{ks}}$

Аналитические оценки напряжений в регулярной сетчатой структуре оболочки без обшивки и без вырезов хорошо согласуются с вычислительным экспериментом. Различия в расчетах заметны только в случае малого радиуса оболочки и не превосходят 5% (рисунок 5, б). Изменение радиуса оболочки наиболее существенно влияет на изгибные напряжения в кольцевых ребрах и практически не сказывается на остальных параметрах напряженного состояния.

Наличие обшивки, даже весьма тонкой, существенно изменяет напряженно-деформированное состояние ребер сетчатой оболочки. Рассматривался

структурный элемент сетчатой оболочки, состоящий из отрезка спирального ребра, половины отрезка кольцевого ребра и прямоугольника обшивки.

Окружные напряжения в обшивке $\sigma_k^{обш}$ зависят от окружных и осевых деформаций, которые, в свою очередь, зависят от угла между спиральными ребрами. Поскольку знаки этих деформаций различны, окружное напряжение в обшивке может обращаться в нуль и даже менять знак при изменении угла между ребрами, что может влиять на устойчивость ребер.

Оценки изгибных напряжений ребер являются приближенными (верхними оценками). Для практических расчетов в них необходимо ввести поправочные коэффициенты, которые определены многофакторным вычислительным экспериментом. С увеличением толщины обшивки значения напряжений σ_s и σ_t уменьшаются по абсолютной величине (рисунок 5, а). При этом отношения $\frac{\sigma_s}{E_s}$ и

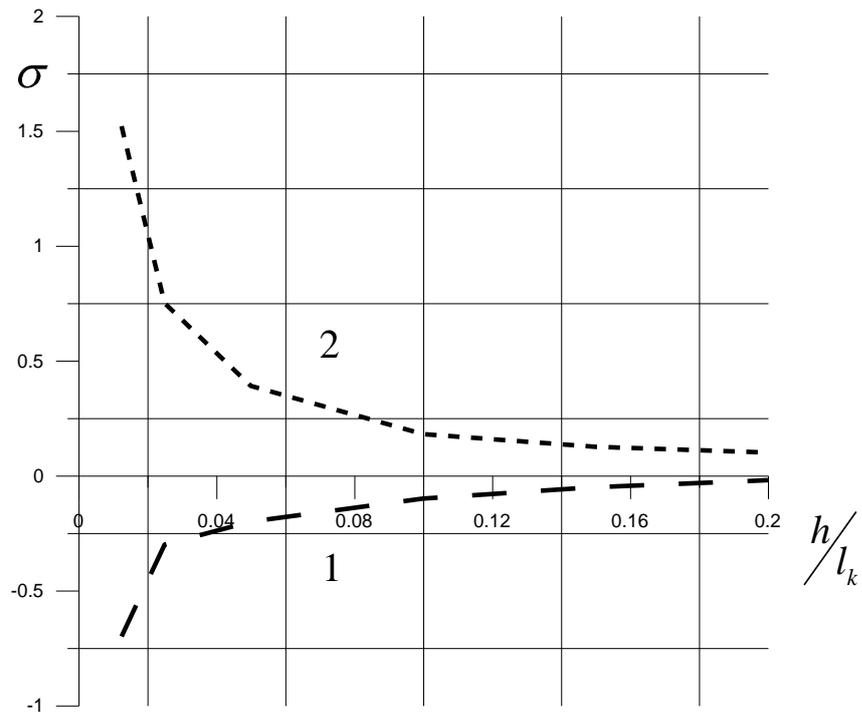
$\frac{\sigma_k}{E_k}$ остаются постоянными.

Оценивалось влияние выноса обшивки на напряженное состояние конструкции. Показано, что размещение обшивки снаружи и внутри сетки ребер мало влияет на изменение напряжений в кольцевых ребрах и в самой обшивке. Разница числовых расчетов и упрощенной аналитической оценки не превосходит 5%.

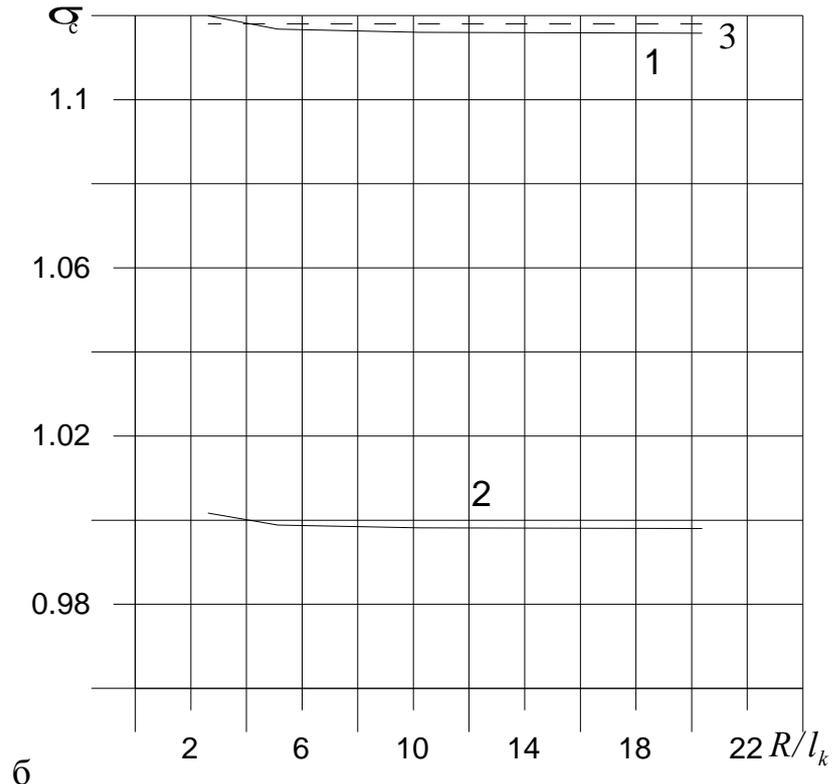
Для повышения точности расчета напряженного состояния сетчатой оболочечной конструкции с обшивкой по аналитическим формулам (таблица 1) были рассчитаны поправочные коэффициенты к этим оценкам путем сравнения численного и аналитического решений.

Проводился полный факторный вычислительный эксперимент с изменением угла α между спиральным ребром и образующей, отношения площадей поперечного сечения кольцевого и спирального ребер $\bar{F}_k = \frac{F_k}{F_c}$.

Варьирование угла α производилось за счет изменения высоты элементарной ячейки L_h при фиксированной ширине L_k . Варьирование безразмерного комплекса \bar{F}_k производилось за счет изменения ширины сечения кольцевого ребра B_k при фиксированном значении высоты спирального ребра B_c .



а



б

Рисунок 5 – Напряжения (в долях σ_0):

а - в обшивке от её толщины h , 1 - σ_s , 2 - σ_t ;

б – средние по сечению в спиральных ребрах (без учета обшивки),
 1 – численный результат, 2 – отношение численного значения к
 аналитической оценке, 3 – аналитические оценки

Построены линейные аппроксимации поправочных коэффициентов для продольных напряжений в ребрах конструкции и для напряжений σ_s , σ_t обшивки и для изгибных напряжений в спиральных ребрах оболочки. Аппроксимации напряжений изгиба в плоскости меньшей жесткости с учетом влияния обшивки адекватны на уровне значимости 5% и имеют вид:

$$K_c^{изз} = -0,964 - 1,01 \left(\frac{L_h}{80} - 2 \right) - 0,952 \left(\frac{B_k}{2,5} - 2 \right) - 0,964 \left(\frac{L_h}{80} - 2 \right) \left(\frac{B_k}{2,5} - 2 \right) \quad (8)$$

Линейные аппроксимации поправочных коэффициентов для изгибных напряжений в плоскости большей жесткости с учетом влияния обшивки неадекватны на уровне значимости в 5% ввиду малых напряжений изгиба в плоскости нормали, что вызывает необходимость использования нелинейных аппроксимаций.

Полученные результаты факторного вычислительного эксперимента используются далее для анализа напряжений в сетчатых оболочках с вырезами.

Четвертая глава посвящена применению факторного анализа напряженно-деформированного состояния к рациональному проектированию сетчатых конструкций с вырезами.

Оценка влияния окантовки шестиугольного выреза на поля напряжений при статическом осевом сжатии проводилась путем сравнения результатов полных факторных вычислительных экспериментов, в которых варьировалась ширина и высота выреза, с рассчитанными напряжениями в аналогичной конструкции с неподкрепленным вырезом. По результатам проведенных вычислительных экспериментов были получены зависимости напряжений в элементах реберной структуры конструкции и напряжений в обшивке от числа перерезанных спиральных и кольцевых ребер, попавших в вырез. Показано, что напряжения в обшивке и ребрах сетчатой структуры, как средние по сечению, так и изгибные, вблизи выреза растут с увеличением числа перерезанных спиральных и кольцевых ребер, попавших в вырез, и получены количественные оценки. Увеличение ширины некомпенсированного выреза оказывает большее влияние на рост напряжений в элементах конструкции, чем изменение высоты, что позволяет рекомендовать использование вырезов, вытянутых вдоль образующей. Увеличение жесткости и ширины окантовки разгружает ребра, но увеличение модуля упругости выше, чем в 1,5 раза, не приводит к дальнейшему снижению значений продольных напряжений в ребрах. Увеличение ширины окантовки уменьшает сжимающие окружные напряжения в окантовке и обшивке, а также снижает концентрацию растягивающих напряжений спиральных ребер около окантовки. На основе полученных оценок могут быть сформулированы рекомендации к рациональному выбору окантовок вырезов отсеков летательных аппаратов сетчатой конструкции.

Оценка влияния геометрии компенсированного выреза проводилась на двух примерах оболочек с усиленным вырезом шестиугольной и четырехугольной формы. Влияние жесткости окантовки таких вырезов оценивалась сравнением концентрации напряжений в конструктивных элементах вблизи окантовки при

варьировании ширины окантовки и выреза, а также материала окантовки (алюминиевый сплав В95, салфетки из углеродной ткани УТ-900 и рубленое углеродное волокно с эпоксидным связующим). Концентрация напряжений в ребрах конструкции с четырехугольным вырезом выше, чем в оболочке с шестиугольным вырезом. В спиральных ребрах вблизи усиленного четырехугольного выреза концентрация напряжений в 1,7-2 раза выше, чем вблизи шестиугольного; в кольцевых ребрах в 1,2-1,3 раза. Концентрация растет с увеличением ширины выреза и уменьшением ширины окантовки вне зависимости от материала окантовки.

Для оценки взаимного влияния двух одинаковых усиленных вырезов рассматривалась цилиндрическая оболочка сетчатой структуры с приложенной к верхней кромке сжимающей силой. Радиус оболочки составляет $R = \frac{64}{\pi} l_k$, где l_k - половина ширины ромбической ячейки. Высота оболочки составляет $1,96R$. Нагрузка на одну пару спиральных ребер задавалась из условия $\sigma_0 = 1$, где σ_0 - отношение приложенной силы к суммарной площади поперечных сечений спиральных ребер. Оребрение состоит из 64 пар спиральных ребер и 21 кольцевого ребра. Толщина спиральных и кольцевых ребер совпадает и равна $0,036R$. Однослойная обшивка, толщиной $0,0024R$, выполнена из материала со следующими физико-механическими характеристиками: модули упругости $E_1 = E_2 = 3000$ кгс/мм², модуль сдвига $G = 500$ кгс/мм², коэффициент Пуассона $\mu_1 = \mu_2 = 0,2$. Конструкция имеет два одинаковых шестиугольных выреза, усиленных окантовкой, расположенных на середине образующей. Ширина окантовки по окружности и по образующей равна одной ромбической ячейки. Окантовка выполнена из углепластика на основе ткани УТ-900, её толщина совпадает с толщиной реберной структуры конструкции.

Факторный вычислительный эксперимент с варьированием ширины, высоты вырезов и расстояния между центрами вырезов позволил сделать следующие выводы:

- взаимное влияние вырезов отсутствует, если расстояние между окантовками вырезов сопоставимо с размерами выреза или превышает его (рисунок 6);
- рост напряжений в ребрах конструкции между вырезами в большей мере зависит от увеличения ширины вырезов и не зависит от увеличения его высоты.

Найденные количественные оценки влияния толщины окантовок на напряжения позволяют обоснованно выбирать соотношение размеров вырезов при ограничениях на величину действующих напряжений.

Рациональное проектирование конструкций летательных аппаратов, нагруженных сжимающими силами, требует учета устойчивости. Для этого был проведен факторный вычислительный эксперимент с расчетами устойчивости сетчатых оболочек без вырезов, с одним вырезом и с двумя одинаковыми шестиугольными вырезами (рисунок 7).

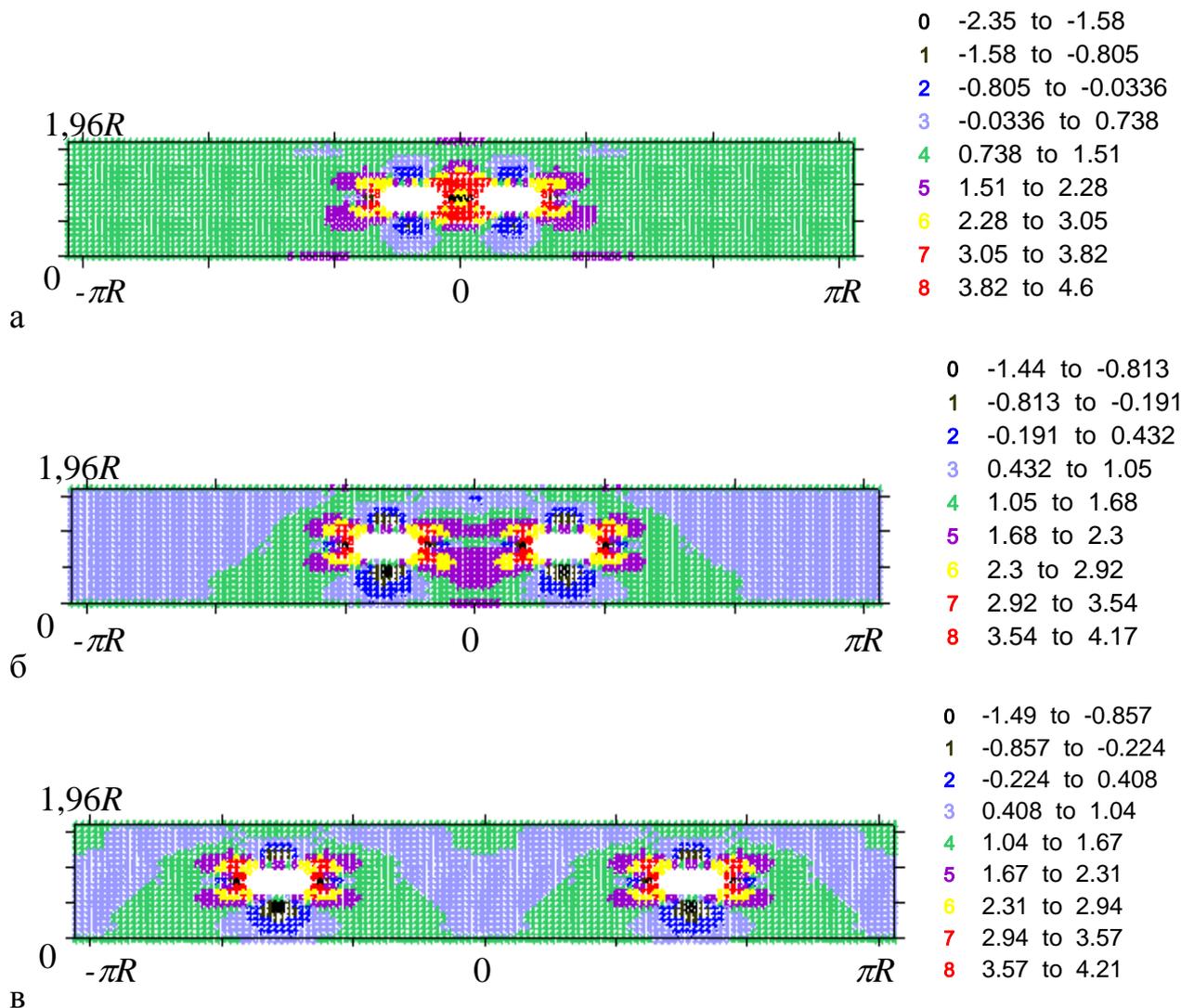


Рисунок 6 – Приведенные напряжения σ_s в кольцевых ребрах при варьировании расстояния между центрами вырезов: а – 8; б – 14; в – 32 ромбических ячеек.

Вырез: высота 3, ширина 6, окантовка 1 ячейка

Расчет на устойчивость проводился по методике, обеспечивающей вычисление нескольких наименьших по абсолютной величине собственных чисел (критических нагрузок) без априорного разделения форм потери устойчивости на общие и местные. В результате для каждой конструкции были рассчитаны по три минимальных по абсолютной величине собственных значения λ пары глобальных матриц жесткости и геометрической жесткости рассматриваемых оболочек и соответствующие им формы потери устойчивости. Такое решение позволяет оценить не только критические нагрузки по первой форме, но и получить информацию об опасности потери устойчивости по одной из следующих форм, важную для конструктора в целях выбора конструктивных решений, повышающих минимальную критическую силу.

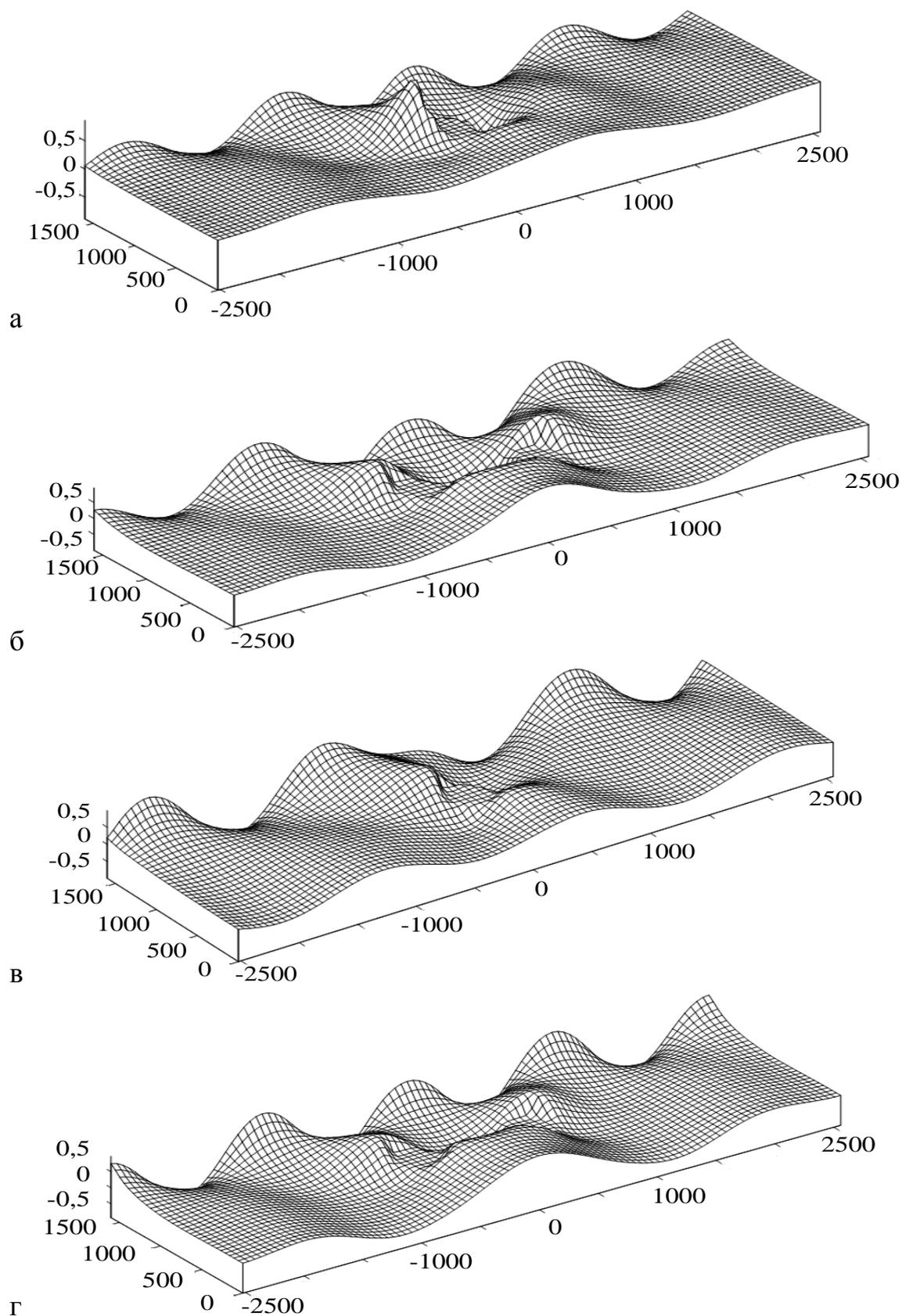


Рисунок 7 – Формы потери устойчивости конструкции.
 Без усиления: а - один вырез ($\lambda_1 = 0,076$), б - два выреза ($\lambda_1 = 0,111$).
 С усилением: в - один вырез ($\lambda_1 = 0,216$), г - два выреза ($\lambda_1 = 0,158$)

Критическая сжимающая сила при наличии в конструкции неподкрепленного выреза шириной $\frac{3\pi R}{16}$ уменьшается в 2,5 раза. При двух симметрично расположенных вырезах критическая нагрузка такая же, как при одном. Взаимное влияние двух одинаковых неподкрепленных вырезов увеличивает критические нагрузки, тем больше, чем меньше расстояние между этими вырезами.

Таким образом, разработанная методика факторного анализа применима к рациональному проектированию сетчатых композиционных конструкций.

В главе 5 рассматривается задача рационального проектирования сетчатых композиционных конструкций нерегулярной структуры, которая заключается в определении таких значений структурных параметров модели ρ , которые удовлетворяют всем заданным ограничениям.

Решение задачи рационального проектирования рассматривалось на примере отсека летательного аппарата из композиционных материалов.

Конструкция представляет собой оребренную оболочку в форме усеченного конуса, имеет двуслойную обшивку и оребрение: 160 пар спиральных ребер и 21 кольцевое ребро. Высота конуса (длина отсека) составляет $44,884l_h$, длина окружности по передней кромке $237,02l_h$, по задней кромке $234,72l_h$ (l_h - половина высоты ромбической ячейки). Оболочка подкреплена двумя торцевыми шпангоутами прямоугольного сечения, имеет три люка, закрытых крышками, и три выреза. Все вырезы усилены окантовками переменной толщины, которые делятся на три зоны (рисунок 8).

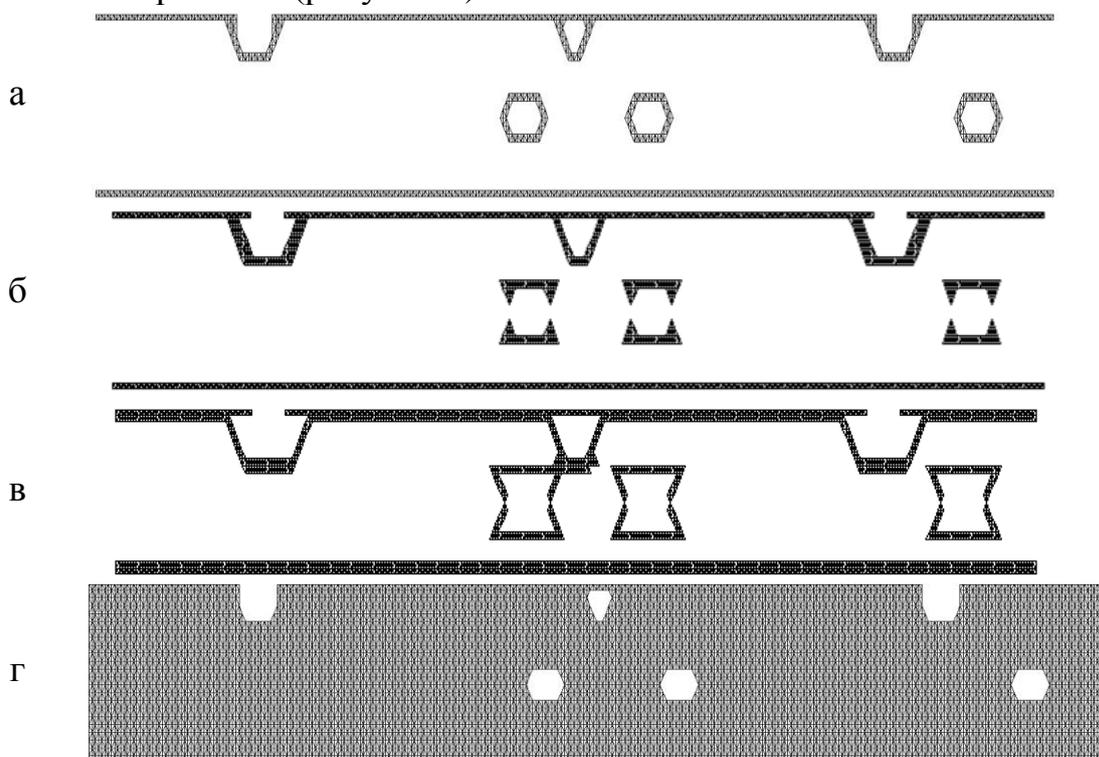


Рисунок 8 – Модель конструкции на развертке:

а – шпангоуты и внутренняя окантовка, б – шпангоуты и средняя окантовка, в – шпангоуты и внешняя окантовка, г – система ребер и вырезы

Задней кромкой оболочка соединена с переходным кольцом, закрепленным на 20 опорах. Расчетная нагрузка - сжимающая сила $P=10174,45$ кН и изгибающий момент $M=0,128P$ кН·м на передней кромке. Вдоль передней кромки расположена дополнительная кольцевая балка, имитирующая отсек, сопрягаемый в реальной конструкции с рассматриваемым.

Ставилась задача рационального подбора толщин окантовок вырезов описанной выше конструкции на этапе проектирования. Для решения поставленной задачи были проведены вычислительные эксперименты по расчету напряжений в элементах конструкции вблизи вырезов при варьировании толщин средней и внешней окантовок и фиксированной толщине внутренних окантовок вырезов.

В исходном приближении толщина внутренней окантовки d_{δ}^0 равнялась высоте сечений ребер, толщина средней d_c^0 и дальней от выреза окантовки d_{δ}^0 взяты равными нулю. Аппроксимирующая функция представлялась в виде:

$$\tilde{Z} = \bar{Z}_0 Z'_0 + \bar{Z}_1 \frac{d_{\delta} - d_{\delta}^0}{d_{\delta} + d_{обш} \frac{E_{обш}}{E_{\delta}}} + \bar{Z}_2 \frac{d_c - d_c^0}{d_c + d_{обш} \frac{E_{обш}}{E_c}} + \bar{Z}_3 \frac{d_{\delta} - d_{\delta}^0}{d_{\delta} + d_{обш} \frac{E_{обш}}{E_{\delta}}}. \quad (9)$$

Коэффициенты \bar{Z}_i при базисных дробно-рациональных функциях рассчитывались методом наименьших квадратов на основе откликов Z'_i в соответствии с план-матрицей, что возможно, так как число точек плана факторного эксперимента превышало количество искомых коэффициентов.

Линии уровня функций аппроксимации коэффициентов концентрации напряжений σ_s в спиральных ребрах средней и дальней окантовок и в самой конструкции вне окантовок позволили определить зону допустимых толщин при условии выполнения ограничений (рисунок 9). На этом рисунке все ограничения выполняются в правой нижней области. При неизменной толщине внутренней окантовки $d_{\delta}^0=0,563l_h$, рекомендуется задать толщину средней окантовки $d_c=0,187l_h$, а толщину дальней от выреза окантовки равной $d_{\delta}=0,094l_h$. На рисунке 8 предложенный вариант обозначен точкой А.

Для проверки рациональности подобранных толщин окантовок был проведен поверочный расчет напряженно-деформированного состояния конструкции отсека летательного аппарата при рекомендуемых размерах усилений вырезов. Рассчитывались поля напряжений в обшивке по слоям и поля продольных напряжений в ребрах конструкции (рисунок 10)

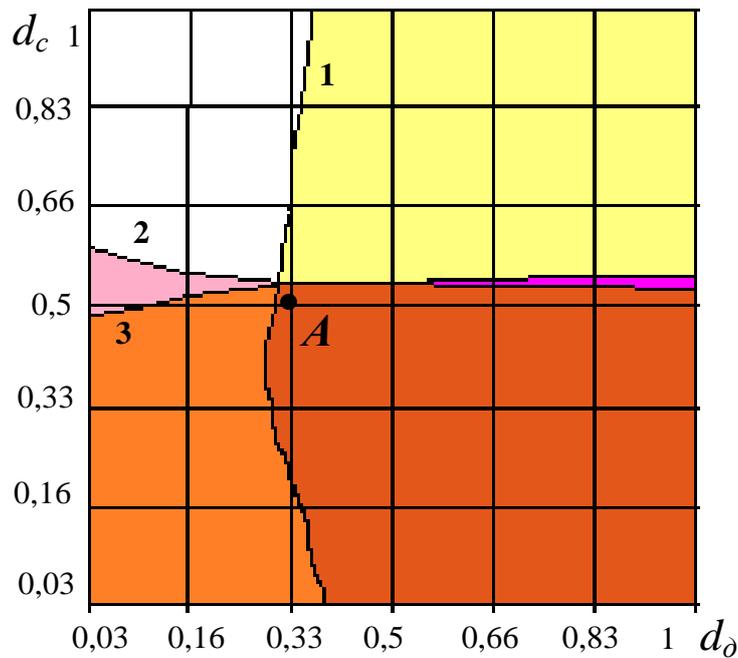


Рисунок 9 – Линии уровня аппроксимирующих функций коэффициентов концентрации напряжений σ_s в спиральных ребрах при $\kappa=1$:
 1 – вне окантовок; 2 – средней окантовки; 3 – дальней от выреза окантовки

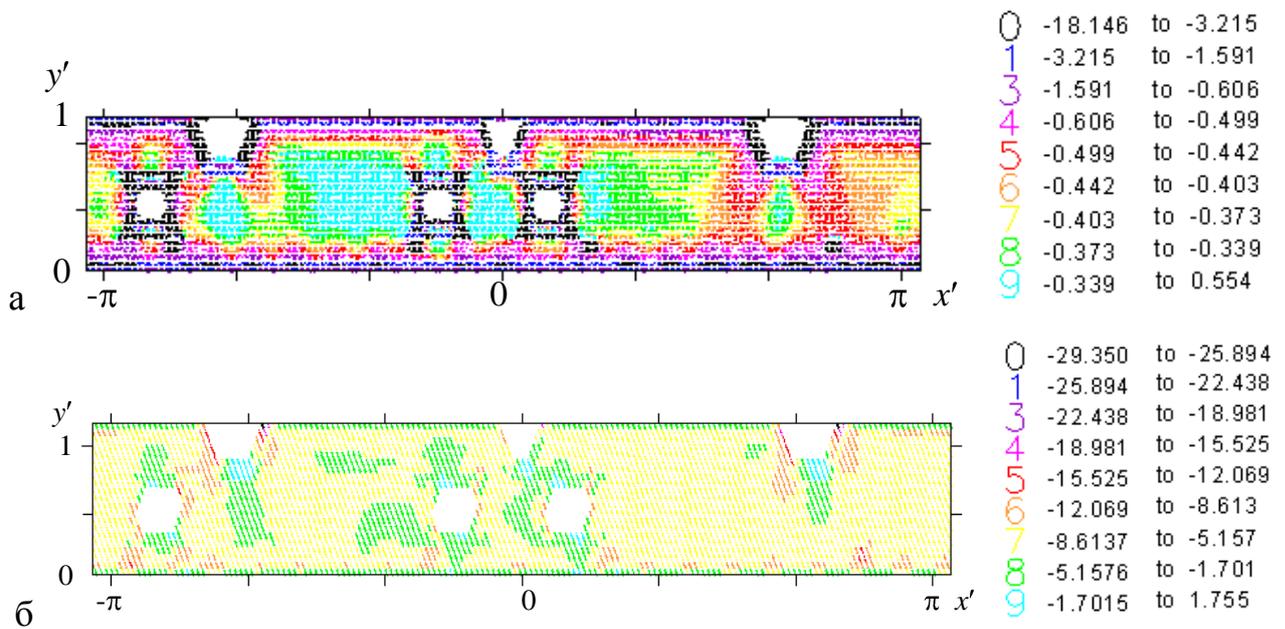


Рисунок 10 – Поля напряжений σ_s :

а – во внешнем слое обшивки; б - в спиральных ребрах

Влияние жесткости обшивки в окрестности вырезов оценивалось анализом напряжений в ребрах, попадающих в зону окантовок вырезов при условии отсутствия обшивки в окантовках (рисунок 11).

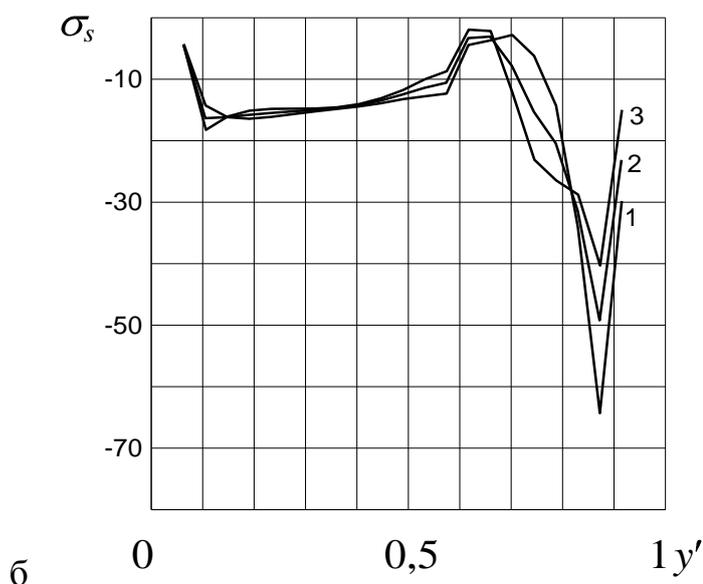
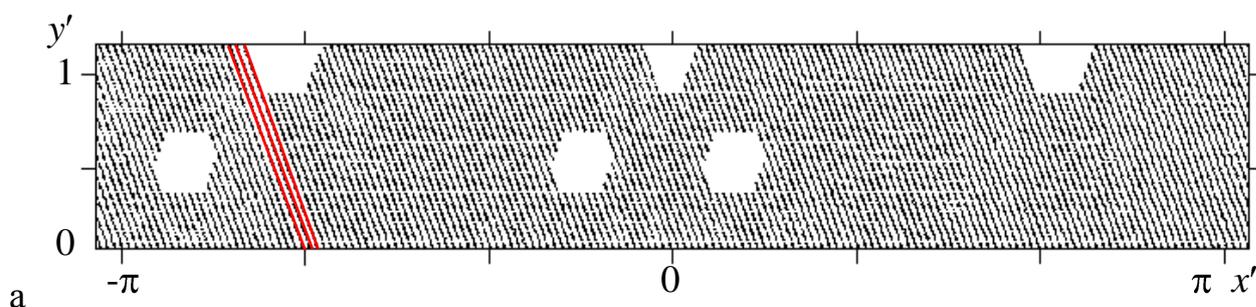


Рисунок 11 – Спиральные ребра, попадающие в зону внутренней окантовки первого выреза: а – на развертке, б - напряжения σ_s

Показано, что по сравнению с базовым вариантом толщин окантовок напряжения увеличились в тех элементах, в которых запас прочности по напряжениям был наибольшим. Это подтверждает обоснованность сделанных рекомендаций.

Шестая глава посвящена разработке метода объективной интерпретации данных натуральных испытаний конструкций летательных аппаратов, основанного на параметрической идентификации математической модели. Приведены формальные постановки и алгоритмы решения двух видов задач: идентификации фактических параметров прочности и жесткости сетчатой конструкции и идентификации параметров приложенной нагрузки. Предлагаемый метод апробирован на задачах идентификации фактических параметров жесткости сетчатых конструкций нерегулярной структуры, а также неконтролируемых параметров нагрузки.

Натурные эксперименты проводились в ОАО ЦНИИСМ, г. Хотьково. Данные экспериментов предоставлены в распоряжение автора и интерпретировались по разработанной в диссертации методике.

Решение задачи идентификации приложенной нагрузки рассматривается на примере составного отсека летального аппарата. Силовая конструкция представляет собой цилиндрическую оболочку и состоит из двух частей:

композитной сетчатой оболочке и стрингерного алюминиевого отсека. Нижняя часть конструкции является цилиндрической сетчатой оболочкой из углепластика в виде усеченного конуса, реберная структура соединена внешней поверхностью с однослойной обшивкой. Высота цилиндра составляет $0,69R$ (R – радиус оболочки). Высота сечения спиральных и кольцевых ребер h_r , одинакова, ширина сечения составляет $0,25h_r$. Расстояние между спиральными ребрами по высоте равно $2,63h_r$. Расстояние между осями пар кольцевых ребер равно $3,56h_r$. Расстояние между ребрами внутри пары $0,25h_r$. Конструкция подкреплена двумя шпангоутами – передним и задним, встроенным кольцом и четырьмя продольными ребрами. Имеется три компенсированных выреза круглой формы, усиленных двумя окантовками переменной толщины. Внешняя окантовка имеет толщину h_e , поверх которой располагается внутренняя окантовка толщиной h_m . Вырезы под люки закрыты крышками, форма которых совпадает с формой вырезов. Люк верхнего выреза усилен тремя вертикальными стрингерами, которые выполнены в виде равнобоких уголков.

Металлический отсек представляет собой конструкцию цилиндрической формы и состоит из однослойной алюминиевой обшивки. Высота этой части конструкции равна $0,53R$. Он содержит четыре равномерно расположенных по окружности проема, частично закрытых несъемными крышками, и укреплен шестью десятками алюминиевых стрингеров и тремя шпангоутами. Стрингерный отсек стыкуется с композитной частью конструкции при помощи соединительного кольца. В средней части стрингерный отсек содержит промежуточный шпангоут сложной геометрии.

Толщины обшивок композитной и алюминиевой частей конструкции равны $h_K = h_C = h$. Дискретная модель составного отсека летательного аппарата представлена на рисунке 12.

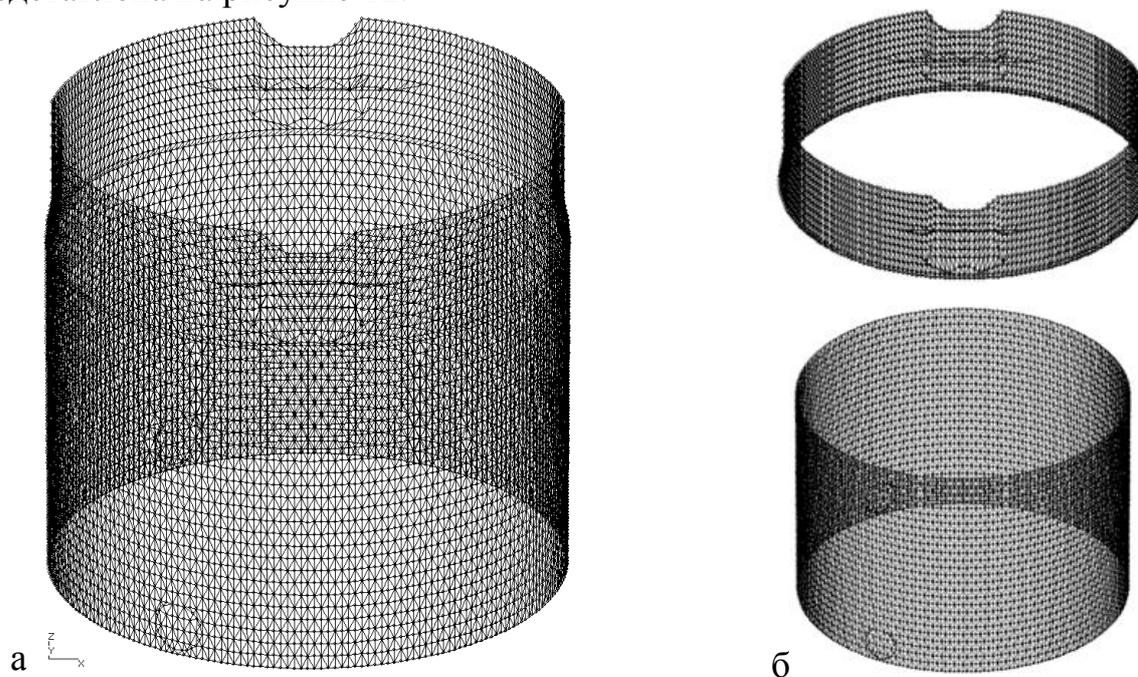


Рисунок 12 – Дискретная модель конструкции:
а – общий вид, б – модели алюминиевой и композитной частей

Задача идентификации приложенной нагрузки формулировалась следующим образом: найти сосредоточенные силы и моменты на «жестком» узле, обеспечивающие минимальное рассогласование вычисленных и измеренных перемещений.

Нагрузка в вычислительном эксперименте представлялась в виде комбинации равномерно приложенной нагрузки \vec{F} и неравномерно распределенной нагрузки, создающей изгибающий момент:

$$\vec{F} = a_1 \cdot \vec{F} + a_2 \cdot \vec{F} \cdot \sin(\alpha) + a_3 \cdot \vec{F} \cdot \cos(\alpha). \quad (10)$$

Распределение перемещений в конструкции в силу линейности деформирования равны линейной комбинации трех полей перемещений с теми же коэффициентами:

$$u = a_1 \cdot u + a_2 \cdot u_s + a_3 \cdot u_c. \quad (11)$$

Критерием идентификации выбирался минимум функционала вида:

$$\Phi = \|U - (a_1 \cdot u + a_2 \cdot u_s + a_3 \cdot u_c)\|, \quad (12)$$

где U - вектор значений натурального эксперимента. Базисные функции u , u_s и u_c рассчитывались численно при приложении трех составляющих нагрузок (11) по отдельности. Расчет коэффициентов a_1 , a_2 , a_3 проводился методом наименьших квадратов.

Идентификация модели проводилась по данным испытаний двух однотипных конструкций (А и Б), изготовленных в разное время (рисунок 14).

В процессе нагружения оболочки в определенных её точках измерялись перемещения в направлении образующей. Для этого на конструкции крепились датчики перемещений (экстензометры): 8 в композитной части и 8 в металлическом отсеке. Схема расположения датчиков представлена на рисунке 13.

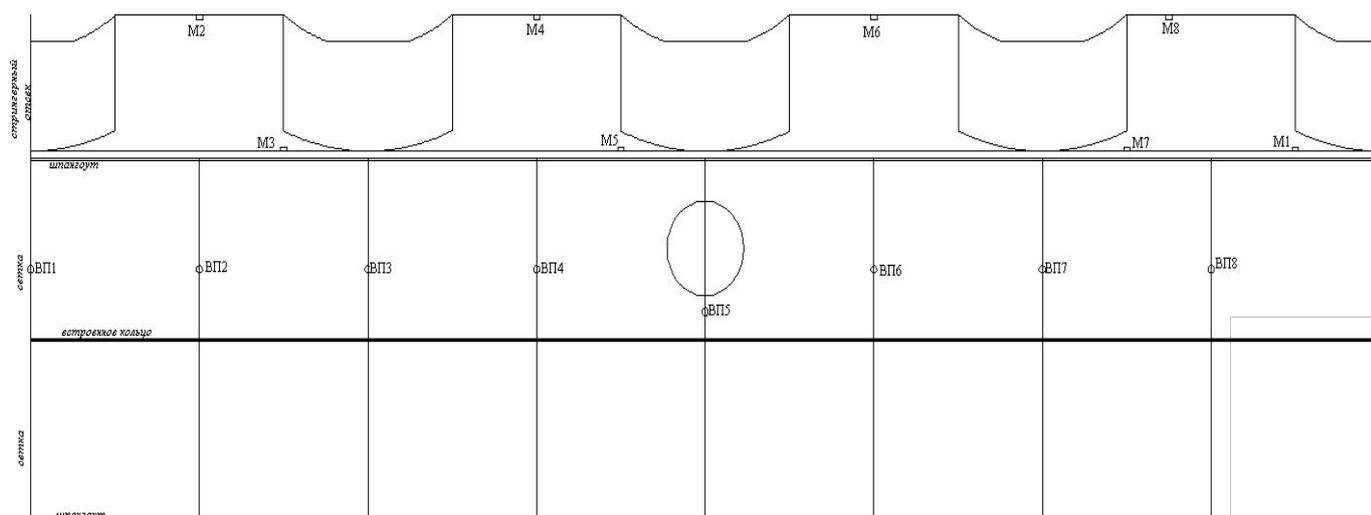


Рисунок 13 – Схема расположения датчиков перемещения и деформации на развертке конструкции

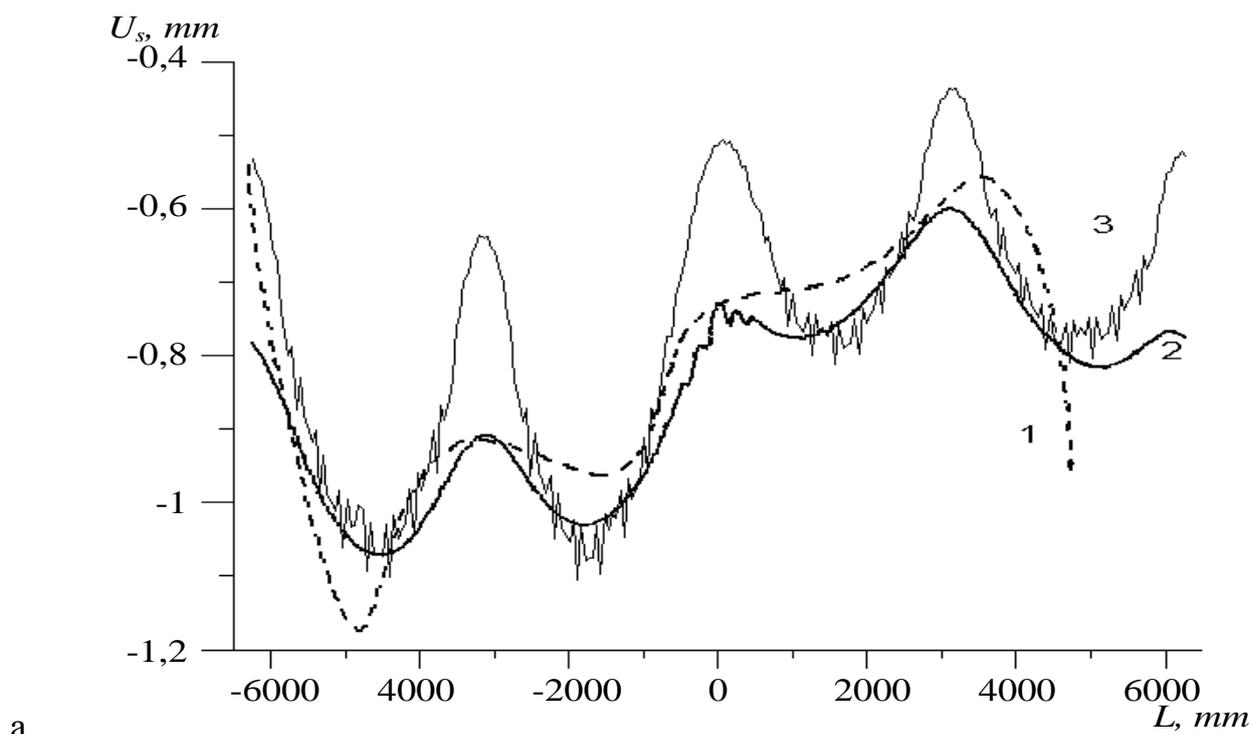
В таблице 2 представлены результаты сопоставления перемещений натурального эксперимента и численного расчета в конструкциях А и Б по восьми датчикам перемещений.

Данных натурального эксперимента и численного расчета Таблица 2

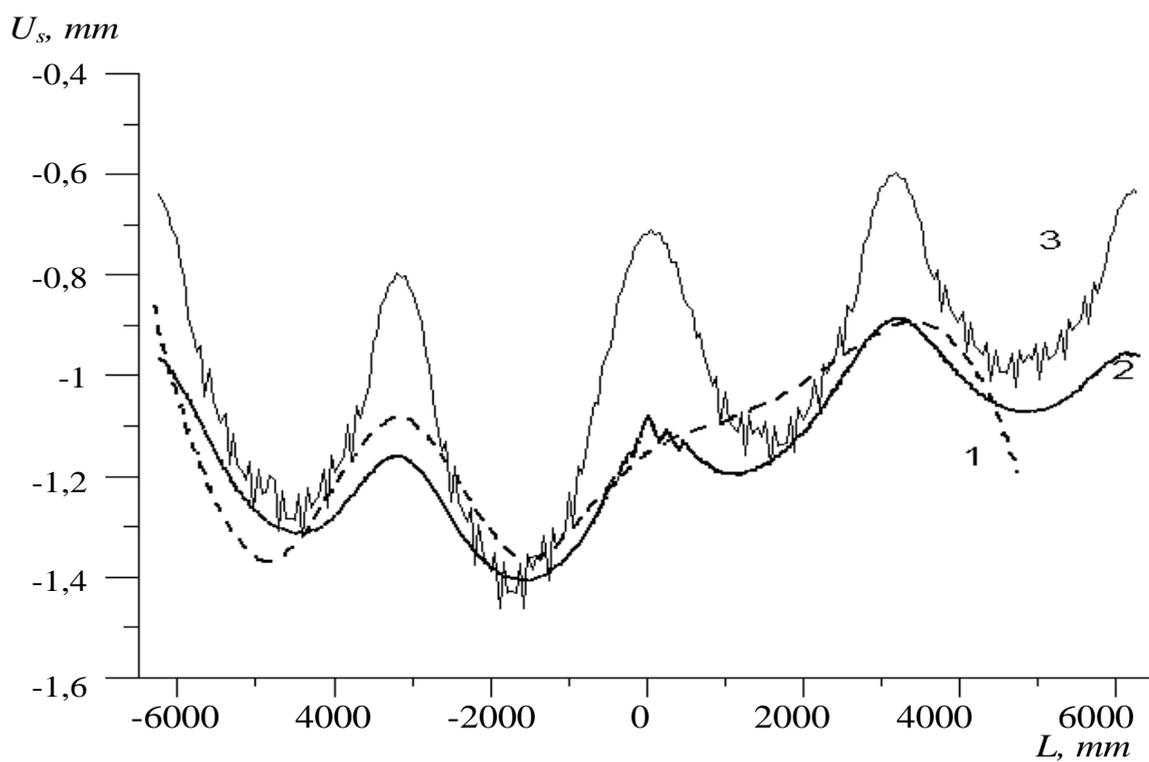
Датчик	Конструкция	Измеренные перемещения, мм	Рассчитанные перемещения, мм		Отклонение вычисленных перемещений от измеренных, %	
			Нагружение через «жесткий» узел	Распределенная нагрузка	Нагружение через «жесткий» узел	Распределенная нагрузка
ВП1	А	0,54	0,7766	0,5294	43,81	1,96
ВП2		1,164	1,0656	1,0938	8,45	6,03
ВП3		0,914	0,9092	0,6395	0,53	30,03
ВП4		0,962	1,0251	1,0675	6,56	10,97
ВП5		0,73	0,6013	0,5143	17,63	29,55
ВП6		0,699	0,7581	0,8121	8,45	16,18
ВП7		0,56	0,6005	0,4384	7,23	21,71
ВП8		0,959	0,7989	0,8085	16,69	15,69
ВП1	Б	0,86	0,963	0,6382	11,98	25,79
ВП2		1,363	1,3038	1,3091	4,34	3,95
ВП3		1,083	1,161	0,8045	7,20	25,72
ВП4		1,363	1,4071	1,4631	3,24	7,34
ВП5		1,155	0,8905	0,719	22,90	37,75
ВП6		1,053	1,1713	1,1756	11,23	11,64
ВП7		0,829	0,8884	0,6021	7,17	27,37
ВП8		1,195	1,0687	1,0225	10,57	14,44

Найдено, что учет фактического отклонения равнодействующей нагрузки от оси оболочки (возникновение изгибающего момента) позволяет уменьшить рассогласование расчетных и измеренных перемещений, и оценены моменты, обеспечивающие минимум рассогласования. Это позволяет распространить результаты статических испытаний на случай других условий нагружения.

Идентификация фактических параметров жесткости отдельных конструктивных элементов позволяет объективно оценить влияние их отклонений от проектных значений на результаты испытаний конкретного экземпляра конструкции. Эта задача решалась для оценки фактической жесткости крышек люков, соединенных с окантовками разъемным соединением. Фактическая жесткость может уменьшаться при недостаточной затяжке соединений (проскальзывании крышки относительно окантовки). В качестве факторов рассматривались жесткости трех крышек люков x_1 , x_2 , x_3 на двух уровнях значимости: проектная жесткость (люк закрыт) и нулевая жесткость (люк открыт). План вычислительного эксперимента включал шесть возможных ситуаций: закрыты все люки; открыт один нижний люк; открыты два нижних люка; открыт верхний люк; открыты один нижний и верхний люки; открыты все люки.



а



б

Рисунок 14 – Распределение осевых перемещений в композиционной части конструкции: а - конструкция А, б - конструкция Б;
 1 – данные натурального эксперимента; 2 – результаты численного расчета при задании нагрузки с использованием «жесткого» узла;
 3 – результаты численного расчета с заданием распределенной нагрузки

Откликом выступали результаты расчета перемещений в композитной части конструкции Б. За критерий идентификации выбирался минимум нормы разности измеренных и рассчитанных напряжений на всем интервале увеличения нагрузки.

На рисунке 15 показаны опорные точки плана и точка А, соответствующая найденным значениям факторов. Определено, что раскрытие люка влияет на перемещения только в окрестности этого люка. Полное раскрытие верхнего люка увеличивает перемещения на 10%. Раскрытие нижних люков оказывает меньшее влияние (до 2%). Найденное решение (рисунок 15, а) позволяет предположить, что при проведении натурного эксперимента произошло частичное открытие верхнего люка композитной части конструкции Б.

Решение данной задачи даёт возможность оценить снижение жесткости, вызванное неполной затяжкой разъемных соединений, что позволяет более обоснованно распространить данные испытаний на другие условия реальной работы конструкции.

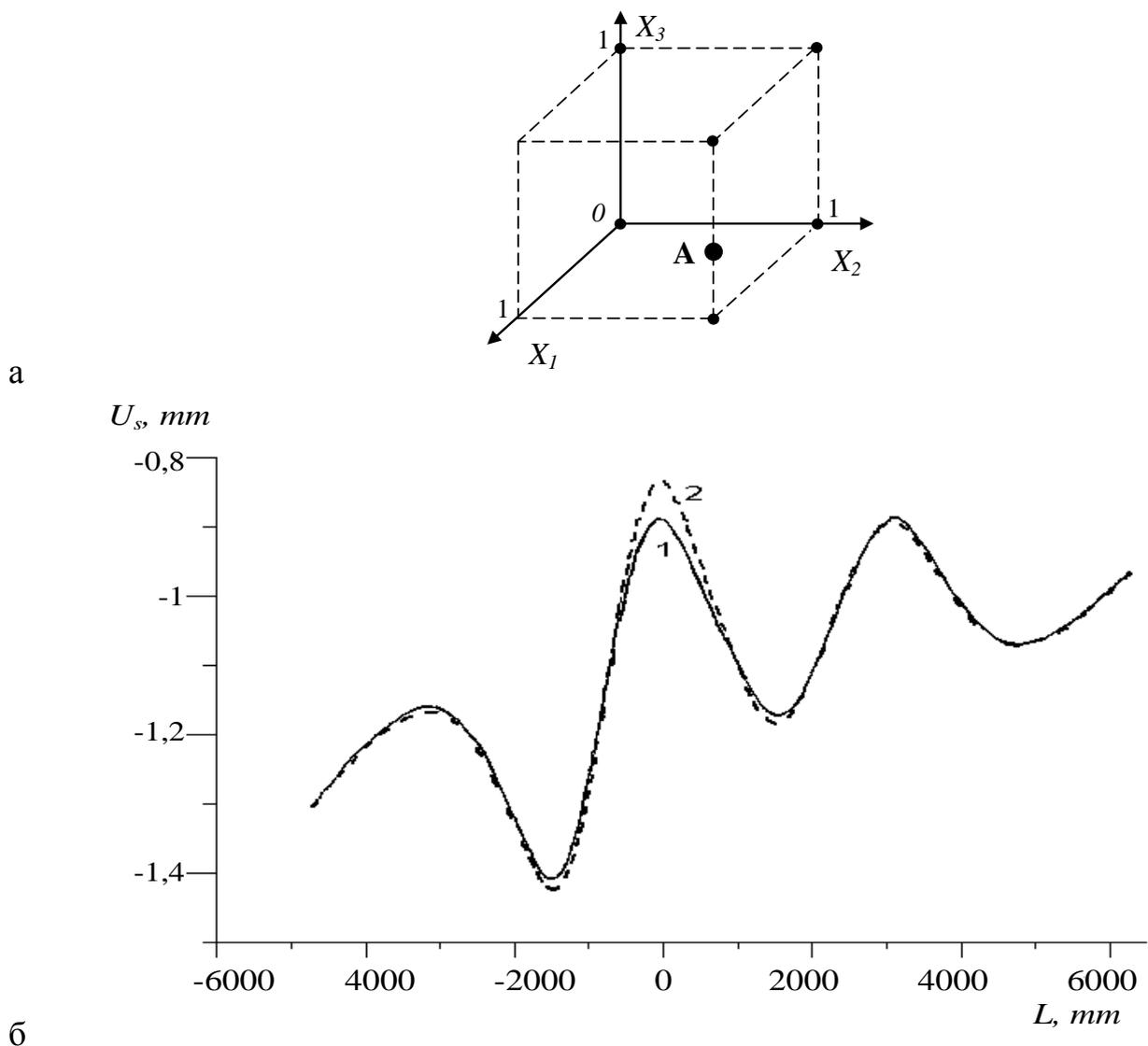


Рисунок 15 – Опорные точки плана вычислительного эксперимента (а); осевые перемещения в композиционной части конструкции (б):
1 – при закрытых люках; 2 – после идентификации

Геометрическая нелинейность деформирования приводит к тому, что фактическая жесткость отдельных конструктивных элементов изменяется в зависимости от уровня нагрузки. Эта ситуация рассмотрена при идентификации фактической жесткости окантовок вырезов отсека летательного аппарата, описанного в главе 5.

Сравнение измеренных и рассчитанных численно перемещений позволило выдвинуть предположение о нелинейной связи перемещений и приложенной нагрузки (рисунок 16, а). Исследование конструкции на устойчивость позволило сделать вывод о том, что потеря устойчивости происходит в локальных зонах, примыкающих к вырезам, а найденные формы потери устойчивости являются местными.

Задача идентификации жесткости окантовок, изменяющейся в процессе нагружения вследствие местной потери устойчивости, формулировалась следующим образом: требуется определить жесткости окантовок вырезов, обеспечивающие минимальное рассогласование вычисленных и измеренных перемещений. В вычислительном эксперименте варьировалась величина приложенной силы, при которой происходит местная потеря устойчивости конструкции. Критерием идентификации выбиралось условие минимума функционала:

$$\Phi = \|U - u(P)\|, \quad (13)$$

где U - вектор перемещений, полученный при проведении натурального эксперимента, $u(P)$ - вектор перемещений, найденный численно, в качестве нормы используется

$$\int_0^{P_{\max}} \max_i |U_i - u_i(P)| dP \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \max_i |U_i - u_i(P)| \cdot P_{\max}. \quad (14)$$

Перемещения $u(P)$ представлялись в виде перемещений, найденных с учетом линейной зависимости от нагрузок, и добавок, пропорциональных формам потери устойчивости u_i :

$$u(P) = C_0 P + C_1 (P - P_1) H(P - P_1) \cdot u_1 + C_2 (P - P_2) H(P - P_2) u_2 + \dots, \quad (15)$$

где $H(P - P_i)$ - единичные функции Хевисайда.

Коэффициенты C_i и фактические нагрузки местной потери устойчивости P_i определялись в результате идентификации. Показано, что учет местной потери устойчивости в расчете полей перемещений позволяет на порядок уменьшить рассогласование результатов расчета и эксперимента. Так, в отсеке летательного аппарата в зоне второго люка (датчики п9, п10, п11) погрешность вычисленных перемещений с учетом местной потери устойчивости не превысила 5% (рисунок 16, б).

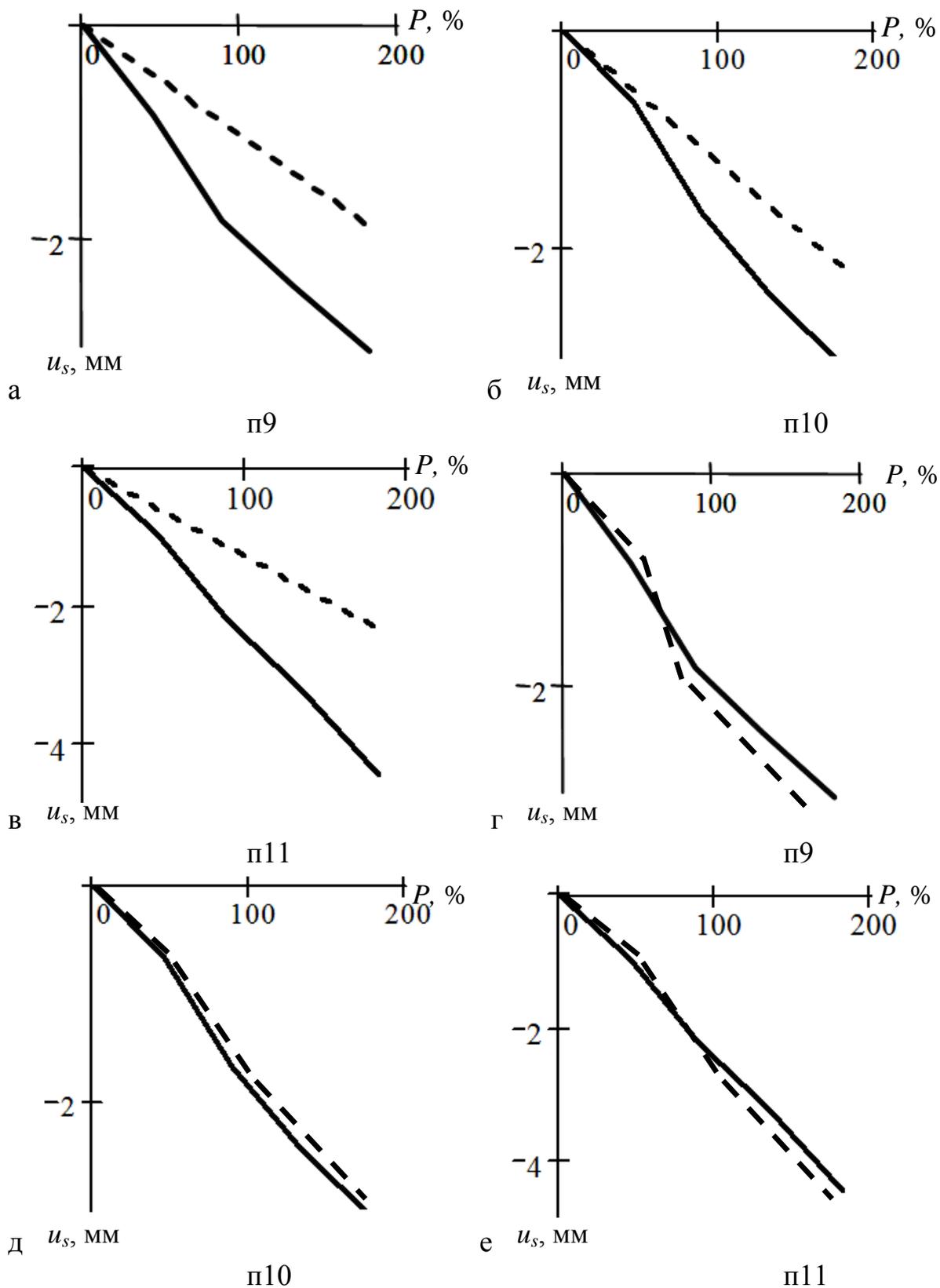


Рисунок 16 – Диаграммы деформирования отсека летательного аппарата в местах расположения датчиков п9, п10, п11: а – при линейной зависимости перемещений от нагрузок, б – после идентификации; ----- – данные численного расчета, ———— данные эксперимента

Учет нелинейности перемещений в задаче идентификации жесткостей окантовок отсека летательного аппарата по данным натурального эксперимента дает возможность составить более полное представление о работе окантовок вырезов и самой конструкции в целом при статическом нагружении. Напряжения, соответствующие окончательно определенным перемещениям, не превышают предела прочности материала, но существенно (на 15-20%) превышают напряжения, рассчитанные в линейном приближении при проектных параметрах конструкции. Это позволяет более обоснованно сформулировать заключение о прочности по данным натурных испытаний.

Таким образом, разработан достаточно общий метод, позволяющий производить объективную интерпретацию данных натурных испытаний на основе математической модели и технологии факторного вычислительного эксперимента.

В диссертационной работе получены следующие основные результаты.

1. Учитывая основные соотношения теории тонких ортотропных пластин и соотношения балочной теории ребер с учетом гипотезы Тимошенко, построена многофакторная математическая модель статического деформирования сетчатых композиционных конструкций регулярной и нерегулярной структуры, основанная на классе расчетных схем типа пространственной рамы, в которой обшивка и система ребер деформируются совместно, учитываются конструктивные вырезы и окантовки, а параметры прочности и жесткости могут быть переменными по длине ребер.

2. Получены упрощенные аналитические оценки напряжений в сетчатых конструкциях регулярной структуры, позволяющие удовлетворить ограничениям по прочности и жесткости при проектировании.

3. Разработан и предложен метод поверочного расчета напряженно-деформированного состояния сетчатых оболочечных конструкций при статическом сжатии, основанный на построении математической модели с помощью аналитического решения идеализированной задачи и получении поправок путем полного дискретного моделирования системы стержней, обшивки, окантовок конструкции. Метод отличается совместным использованием полного дискретно моделирования, аналитических асимптотических оценок и позволяет определять напряжения в каждом конструктивном элементе оболочки.

4. В результате параметрического исследования напряжений и деформаций в сетчатой оболочечной конструкции, содержащей компенсированные и некомпенсированные вырезы, установлены закономерности влияния размеров вырезов и их окантовки на напряжения в конструктивных элементах и критические нагрузки потери устойчивости, которые могут быть использованы в рациональном проектировании сетчатых конструкций отсеков летательных аппаратов.

5. Разработаны алгоритмы рационального проектирования сложных нерегулярных сетчатых конструкций летательных аппаратов по критерию статической прочности, использующие многофакторный вычислительный эксперимент и редуцирование конечно-элементной модели.

6. Разработаны постановки задач и алгоритмы идентификации фактических условий нагружения, прочностных и жесткостных характеристик сетчатых конструкций по данным натурных испытаний, основанные на применении вычислительного эксперимента и разработанного программного обеспечения, для расчетно-экспериментального обеспечения статической прочности сетчатых конструкций летательных аппаратов.

7. Предложен подход к решению задачи идентификации переменных жесткостных параметров отсека летательного аппарата с учетом геометрически нелинейного деформирования, основанный на представлении поля перемещений в виде линейной комбинации форм местной потери устойчивости, добавляемой к основному полю перемещений, и оценке фактических нагрузок, при которых происходит местная потеря устойчивости по разным формам.

8. Разработано программное обеспечение проектировочных и идентификационных расчетов крупногабаритных сетчатых конструкций агрегатов летательных аппаратов из композиционных материалов при действии статических и квазистатических нагрузок, которое может быть использовано для обеспечения прочности сетчатых конструкций летательных аппаратов на этапах проектирования, опытной отработки и производства.

9. Тем самым разработана единая методология рационального проектирования и диагностики сетчатых конструкций нерегулярной структуры, включающая методы вычислительного эксперимента, многофакторные математические модели статического деформирования сетчатых конструкций и алгоритмы решения задач поверочного расчета, рационального проектирования и параметрической идентификации модели при интерпретации данных натурных испытаний.

10. Показана применимость разработанных методов, алгоритмов и программ при рациональном проектировании, опытной отработке и технической диагностике конструкций агрегатов летательных аппаратов, выполненных из композиционных материалов по силовой схеме оболочек сетчатой структуры.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах.

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. Бурнышева, Т. В. Влияние обшивки на фоновые напряжения при статическом деформировании ферменных конструкций из композитов [Текст] / Т.В. Бурнышева // Научный вестник НГТУ. - 2012. - №3 (48). - С. 93-100.

2. Бурнышева, Т. В. Методика проектировочного расчета сетчатых оболочечных конструкций из композиционных материалов при статическом нагружении [Текст] / Т. В. Бурнышева// Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. - №3. – С. 97-100.

3. Бурнышева, Т. В. Напряженное состояние сетчатых оболочечных конструкций с вырезами при осевом сжатии [Текст] / Т. В. Бурнышева, В.О. Каледин // Известия Алтайского государственного университета. – 2012. -№1. — С. 25-27.

4. Бурнышева, Т. В. Особенности деформирования сетчатых композиционных оболочек при статическом осевом сжатии [Текст] / Т.В.

Бурнышева, В.О. Каледин, А.Б. Миткевич // Заводская лаборатория. Диагностика материалов.- 2012. - Т. 78. - № 11. - С. 61-65.

5. Бурнышева, Т. В. Оценка взаимного влияния составных частей оболочечной конструкции при осевом сжатии [Текст] / Т. В. Бурнышева, А. Ф. Разин, О. А. Штейнбрехер // Научно-технический вестник Поволжья. –2012. -№2. — С. 127-131.

6. Бурнышева, Т. В. Решение задачи устойчивости сетчатых оболочек из композиционных материалов при статическом нагружении [Текст] / Т. В. Бурнышева, Ю.А. Кравцова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. - №1. – С. 101-105.

7. Бурнышева, Т. В. Сравнение дискретного и континуального подхода к расчету напряженного состояния сетчатых оболочечных конструкций при статическом нагружении [Текст] / Т. В. Бурнышева, В.О. Каледин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. - №4. – С. 113-116.

8. Бурнышева, Т. В. Учет конструктивных вырезов при расчете полей напряжений ортогональных оболочечных конструкций из композиционных материалов при статическом деформировании [Текст] / Т.В. Бурнышева // Научный вестник НГТУ. - 2011. - №3 (44). - С. 93-102.

9. Бурнышева, Т. В. Фоновые напряжения в ферменных конструкциях из композитов [Текст] / Т.В. Бурнышева, В.О. Каледин, А.Б. Миткевич // Научный вестник НГТУ. - 2011. - №3 (44). - С. 103-114.

10. Математическое моделирование статики сетчатой оболочки с учетом концентрации напряжений [Текст] / Т.В. Бурнышева[и др.] // Вестник ТГУ. Сер. «Математика. Кибернетика. Информатика». – 2006. - №19. – С.233-237.

11. Развитие пакета программ математического моделирования сопряженных задач механики неоднородных конструкций [Текст] / Т.В. Бурнышева [и др.] // Вестник Кемеровского государственного университета. - 2010. - №1 (41). - С. 3-8.

12. Бурнышева, Т. В. Математическая модель совместного деформирования элементов анизотридных конструкций космических летательных аппаратов [Текст] / Т. В. Бурнышева // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. - №6. – С. 94-97.

13. Бурнышева, Т. В. Применение методологии вычислительного эксперимента в задачах проектирования и диагностики анизотридных конструкций космических летательных аппаратов [Текст] / Т. В. Бурнышева// Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. - №6. – С. 98-102.

14. Каледин, В.О. Интерпретация данных натурных испытаний оболочечной композитной конструкции при статическом осевом сжатии [Текст] / В.О. Каледин и др.// Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – Т. 81. – № 3. – С. 53-58.

В прочих изданиях

15. Бурнышева, Т. В. Автоматизация вычислительного эксперимента в механике конструкций [Текст] / Т. В. Бурнышева, В.О. Каледин, И.В. Бухарова //

Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. - 2013. – Вып. 1(168) — С. 23-28.

16. Бурнышева, Т.В. Влияние обшивки на фоновые напряжения при статическом деформировании композиционных сетчатых оболочек [Текст] / Т.В. Бурнышева // Краевые задачи и математическое моделирование: сб. ст. 9-ой Всероссийской науч. конф. В 3 т. - Новокузнецк. - 2008. - Т.2. – С. 105-111.

17. Бурнышева, Т.В. Дискретное моделирование напряжений в сетчатых оболочках [Текст] / Т.В. Бурнышева, В.О. Каледин, Е.В. Решетникова // Краевые задачи и математическое моделирование: сб. тр. 8-й Всероссийской науч. конф. - Новокузнецк: НФИ КемГУ. - 2006. - В 2-х т. Т.2. - С. 16-19.

18. Бурнышева, Т.В. Исследование влияния сквозных вырезов на устойчивость сетчатых оболочечных конструкций [Текст] / Решетневские чтения: материалы XV Междунар. науч.конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М.Ф. Решетнева (10-12 нояб. 2011, . Красноярск): в 2 ч. // под общ. ред. Ю.Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т.- Красноярск, 2011. - Ч.2. – С. 438-439.

19. Бурнышева, Т.В. Исследование концентрации напряжений в окрестности вырезов в сетчатых оболочках [Текст] / Т.В. Бурнышева, Е.В. Решетникова // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды пятой Всероссийской научной конференции с международным участием. Ч.1:Математические модели механики, прочности и надёжности элементов конструкций. – Самара: СамГТУ. - 2008. – С. 69-71.

20. Бурнышева, Т.В. Исследование концентрации напряжений в окрестности вырезов сетчатых оболочек из полимерных композиционных материалов [Текст] / Т.В. Бурнышева, В.О. Каледин, Е.В. Решетникова // Инновационные недра Кузбасса. IT-технологии: Сб. науч. тр. - Кемерово: ИНТ. - 2007. - С. 273-275.

21. Бурнышева, Т.В. Исследование статического деформирования оребренной оболочечной конструкции с технологическими вырезами [Текст] / Т.В. Бурнышева // Краевые задачи и математическое моделирование: тематич. ст. науч. ст.: в 3 т. Т.1. / НФИ ГОУ ВПО «КемГУ» под общ. ред. В.О. Каледина. – Новокузнецк: РИО НФИ КемГУ, 2010 – С. 42-52.

22. Бурнышева, Т.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния сетчатых оболочечных конструкций из композиционных материалов при статическом нагружении [Текст] / Т.В. Бурнышева // Материалы XVII Международной конференции по механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2011). – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ. - 2011. – С.44-46.

23. Бурнышева, Т.В. Напряженное состояние сетчатых оболочечных конструкций с вырезами при осевом сжатии [Текст] / Т.В. Бурнышева, В.О. Каледин // Численные методы решения задач упругости и пластичности: Тезисы докладов XXII Всероссийской конференции, Барнаул, 4-7 июля 2011 г./ Под ред. В.М. Фомина. -Новосибирск: Нонпарель, 2011. - С. 15-17.

24. Бурнышева, Т. В. Осевое сжатие оребренных конструкций из композиционных материалов [Текст] / Т.В. Бурнышева // Вестник Кемеровского государственного университета. - 2009. - №4 (40). - С. 40-46.

25. Бурнышева, Т.В. О программной реализации расчета устойчивости оболочечной конструкции при геометрически нелинейном докритическом состоянии [Текст] / Т.В. Бурнышева, Я.С. Крюкова // Краевые задачи и математическое моделирование: тематич. ст. науч. ст.: в 3 т. Т.3. / НФИ ГОУ ВПО «КемГУ» под общ. ред. В.О. Каледина. – Новокузнецк: РИО НФИ КемГУ, 2010 – С. 88-91.

26. Бурнышева, Т.В. О решении задачи устойчивости оболочечных конструкций из композиционных материалов [Текст] / Т.В. Бурнышева, Ю.А. Дудина // Краевые задачи и математическое моделирование: тематич. ст. науч. ст.: в 3 т. Т.2. / НФИ ГОУ ВПО «КемГУ» под общ. ред. В.О. Каледина. – Новокузнецк: РИО НФИ КемГУ, 2010 – С. 142-149.

27. Бурнышева, Т.В. Параметрическое исследование влияния геометрии окантовок вырезов на концентрацию напряжений в сетчатых оболочечных конструкциях [Текст] / Т.В. Бурнышева, Е.В. Решетникова // Материалы XVI Международной конференции по механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2009). – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ. - 2009. – С.161-163.

28. Бурнышева, Т.В. Параметрическое исследование концентрации напряжений в окрестности вырезов в сетчатых оболочках из полимерных композиционных материалов [Текст] / Т.В. Бурнышева // Материалы XV Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2007). – М.: Вузовская книга. - 2007. – С.106-107.

29. Бурнышева, Т.В. Применение вычислительного эксперимента при расчете напряженно-деформированного состояния канического адаптера [Текст] / Т.В. Бурнышева, О.А. Штейнбрехер, А.Д. Ульянов // Краевые задачи и математическое моделирование: сборник тематических научн. статей - Новокузнецк. - 2014. – С. 105-111.

30. Бурнышева, Т.В. Программно-методическое обеспечение прочностных расчетов анизотридных конструкций [Текст] / Т.В. Бурнышева, В.О. Каледин // Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций: сборник материалов III Всерос. конф. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – С. 45-46.

31. Бурнышева, Т.В. Расчет коэффициентов концентрации при статическом деформировании ферменных конструкций из композиционных материалов [Текст] / Решетневские чтения: материалы XIV Междунар. науч.конф., посвящ. памяти генерал. конструктора ракет.-космич. систем академика М.Ф. Решетнева (10-12 нояб. 2010, . Красноярск): в 2 ч. // под общ. ред. Ю.Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т.- Красноярск, 2010. - Ч.2. – С. 380-381.

32. Бурнышева, Т.В. Расчет напряженно-деформированного состояния в сетчатых оболочках с усиленными вырезами при статическом нагружении [Текст]

/ Т.В. Бурнышева // Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций: тез. докл. II Всерос. конф. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 19-20.

33. Бурнышева, Т.В. Расчет напряженно-деформированного состояния оболочечной конструкции сложной структуры пакетом программ «КОМПОЗИТ-НК» [Текст] / Т.В. Бурнышева, О.А. Штейнбрехер // Материалы XVII Международной конференции по механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2011). – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ. - 2011. – С.175-176.

34. Бурнышева, Т. В. Статическое деформирование композиционных сетчатых конструкций. Влияние обшивки на фоновые напряжения [Текст]/ Т. В. Бурнышева, [и др.] // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2009. – Вып. 3(154) – 4(155) — С. 5-10.

35. Бурнышева, Т.В. Учет жесткости обшивки при статическом деформировании композиционных сетчатых оболочек [Текст] / Т.В. Бурнышева, В.О. Каледин, Е.В. Решетникова // Краевые задачи и математическое моделирование: сб. ст. 9-ой Всероссийской науч. конф. В 3 т. - Новокузнецк. - 2008. - Т.2. – С. 120-122.

36. Бурнышева, Т.В. Численный расчет напряженно-деформированного состояния оболочек сложной структуры [Текст] / Т.В. Бурнышева, О. А. Штейнбрехер // Вестник Восточно-Казахского государственного технического университета, Вычислительные технологии Ч.1. – 2013. - С. 124 - 128.

Подписано в печать 03 июля 2015 г. Формат 60×84 1/16.

Бумага писчая. Ризография.

Уч.-изд. л. 2,5. Тираж 100 экз.

Новокузнецкий институт (филиал)
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
Высшего профессионального образования
«Кемеровский государственный университет»
654000, г.Новокузнецк, пр. Metallургов, 19, тел. (3843) 74-15-41.
Редакционно-издательский отдел