

На правах рукописи



Штейнбрехер Ольга Александровна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА, АЛГОРИТМА И ПРОГРАММНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ АНИЗОГРИДНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новокузнецк – 2018

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

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Бурнышева Татьяна Витальевна

Официальные оппоненты: **Кургузов Владимир Дмитриевич**,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева
Сибирского отделения Российской академии наук,
ведущий научный сотрудник;

Лопатин Александр Витальевич,
доктор технических наук,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный университет науки и
технологий имени академика М.Ф. Решетнева»,
заведующий кафедрой компьютерного моделирования

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники»,
г. Томск

Защита диссертации состоится «31» мая 2018 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.06 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный 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>

Автореферат разослан «__» апреля 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Фаддеенков Андрей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В современных конструкциях аэрокосмического назначения широко используются анизотридные сетчатые оболочки, структура которых образуется пересечением семейств спиральных и кольцевых ребер. Уникальность каждой конструкции определяется наличием вырезов и подкрепляющих элементов. Данный класс конструкций относят к силовому типу, поэтому на стадии проектирования часто решается задача синтеза (оптимального проектирования). Суть задачи заключается в выборе такой структуры или таких параметров создаваемого изделия, которые обращают в максимум или минимум одну из его характеристик и удовлетворяют всем ограничениям по прочности, жесткости, устойчивости. В качестве целевых функций при оптимизации силовых конструкций аэрокосмического назначения наиболее часто используются такие как вес, меры жесткостных свойств, а также отношения, определяющие критические значения параметров нагружения, приводящих к потере устойчивости, для тонкостенных конструкций.

Задача оптимизации по массе многоэлементной статически неопределимой конструкции, к которым относятся анизотридные конструкции из композиционных материалов, является однокритериальной. Целевая функция (масса конструкции) зависит от варьируемых проектных параметров непрерывно вместе со своими производными. При использовании прямого метода минимизации число варьируемых параметров приходится ограничивать из соображений компьютерной эффективности, но вполне реалистично наличие нескольких десятков варьируемых параметров.

Ограничения по прочности, жесткости и устойчивости анизотридных конструкций выражаются через параметры напряженно-деформированного состояния при расчетных нагрузках, которые, в свою очередь, зависят от варьируемых проектных параметров конструкции. Поскольку параметры напряженно-деформированного состояния зависят от положения точки (являются полями перемещений, напряжений и деформаций), ограничения по прочности и жесткости должны формулироваться для достаточно большого числа характерных точек конструкции. Применительно к анизотридным конструкциям, таких точек может быть несколько тысяч. Таким образом, в формулировку задачи может входить большое число ограничений, на несколько порядков превышающее число варьируемых параметров.

В настоящее время достаточно проработаны и известны методы оптимального проектирования сетчатых анизотридных конструкций регулярной реберной структуры при условии отсутствия обшивки. Решение задачи оптимального проектирования силовой анизотридной

сетчатой конструкции нерегулярной структуры является актуальной и требует разработки метода и алгоритма решения задачи оптимизации, учитывающего все ограничения при определении области допустимых решений.

Степень разработанности темы исследования

Основной вклад в разработку сетчатых анизотридных конструкций из композиционных материалов 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. Дискретный подход к моделированию сетчатых анизотридных конструкций для оценки напряженно-деформированного состояния использовали В.В. Васильев, А.Ф. Разин, А.А. Бабичев, В.П. Булдаков, М.В. Никитин и др. Исследования сетчатого адаптера (без обшивки) на устойчивость с использованием дискретного моделирования проводили Морозов Е.В., Лопатин А.В., Нестеров В.А.

Разиным А.Ф. получены аналитические оценки на проектные параметры сетчатых оболочек из композиционных материалов регулярной структуры без обшивки. Решались задачи оптимального проектирования сетчатых цилиндрических и конических оболочек при условии минимума массы конструкции. В качестве ограничений выступали условия по прочности, общей, местной и осесимметричной формам потери устойчивости, а также ограничения, специфические для композитных сетчатых конструкций, изготавливаемых методом непрерывной намотки.

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. Сетчатая оболочка имела регулярную реберную структуру, моделирование которой проводилось дискретно.

В.П. Полиновский использовал численный метод при выборе оптимальных параметров композитного сетчатого отсека агрегата космического летательного аппарата по критерию минимума массы. Методика выбора оптимальных параметров анизотридных конструкций содержала несколько этапов – построение дискретных моделей с различными значениями углов наклона спиральных ребер, подбор высоты кольцевых и спиральных ребер и ширины спирального ребра при критерии минимума массы с учетом ограничений по прочности и устойчивости. Данный метод не гарантирует отыскание оптимума, поскольку не учитывает взаимное влияние размеров сечения и углов наклона спирального ребра.

Таким образом, в настоящее время достаточно разработаны аналитические методы решения задачи оптимального проектирования

анизотридных конструкций регулярной структуры без обшивки при критерии минимума массы.

Определение оптимальных параметров анизотридной конструкции с обшивкой и нарушением регулярности реберной структуры рассматривалось для конкретных изделий с определенными условиями нагружения. Известные методы и алгоритмы решения задачи минимизации не позволяют в полной мере учесть особенности, возникающие в связи со сложной структурой анизотридных конструкций, состоящих из множества элементов и определяющих большое число ограничений и неизвестных. Это делает актуальной разработку метода и алгоритма решения задач оптимального проектирования сетчатых анизотридных конструкций нерегулярной структуры из условия минимума массы с учетом ограничения структурных параметров и параметров состояния.

Цель работы заключается в разработке метода, алгоритма и реализующего их программного обеспечения для решения задачи минимизации массы сетчатых анизотридных конструкций с большим числом структурных параметров и переменных состояния.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Разработка математической модели объекта оптимизации посредством представления множества ограничений в виде аппроксимации кусочно-гладкой границы аппаратом R-функций.

2. Разработка численного метода решения задачи оптимизации, основанного на гладкой аппроксимации границы области возможных решений, в котором последовательность приближений строится по модели упругого симплекса.

3. Разработка и программная реализация алгоритма численного метода минимизации массы анизотридных конструкций с учетом большого числа ограничений структурных параметров и параметров состояния по методу упругого симплекса.

4. Тестирование разработанного численного метода задачи минимизации при учете нескольких ограничений на задачах, имеющих точное аналитическое решение.

5. Апробация разработанных численного метода и алгоритма оптимизации проектных параметров сетчатых анизотридных конструкций из условия минимума массы на сетчатых оболочках регулярной и нерегулярной структуры с учетом ограничений на большое число переменных состояния.

Научная новизна исследования.

1. Разработана математическая модель объекта оптимизации посредством представления множества ограничений в виде аппроксимации кусочно-гладкой границы аппаратом R-функций.

2. Разработан численный метод расчета минимума целевой функции на основе симплексного поиска, в котором множество кусочно-

гладких границ области допустимых решений заменяется единым выпуклым R -предикатом, а симплекс считается связанным с ближайшими границами посредством упругих связей, реакции которых влияют на направление поиска.

3. Разработан новый алгоритм решения задачи оптимизации проектных параметров сетчатых анизотридных конструкций по массе с ограничениями на структурные параметры и переменные состояния.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается:

- в разработанном методе и алгоритме минимизации нелинейной целевой функции с учетом большого числа ограничений по модели упругого симплекса;

- в разработанном программном обеспечении, реализующем алгоритм минимизации нелинейной целевой функции с учетом большого числа ограничений по модели упругого симплекса;

- в возможности применять разработанные метод, алгоритм и программное обеспечение для оптимизации проектных параметров силовых анизотридных композиционных конструкций нерегулярной структуры по массе с учетом множества ограничений.

Результаты работы внедрены:

- в ОАО «ЦНИИСМ» - разработанные метод, алгоритм и созданное программное обеспечение для оптимального проектирования силовых анизотридных композиционных конструкций нерегулярной структуры с повышенным весовым совершенством;

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

Методология и методы исследования

Методы исследования основаны на использовании: метода симплексного поиска, теории R -функций, метода конечных элементов для решения краевых задач статики и устойчивости, методов вычислительного эксперимента.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель объекта оптимизации, в которой число ограничений уменьшается заменой нескольких участков кусочно-гладкой границы одним гладким участком с использованием аппарата R -функций.

2. Численный метод решения задачи оптимизации, в котором приближения строятся по модели упругого симплекса.

3. Алгоритм оптимизации проектных параметров анизотридных конструкций по массе с множеством ограничений методом упругого симплекса.

4. Программный комплекс, реализующий алгоритм оптимизации проектных параметров анизотридных конструкций по массе с ограничениями по модели упругого симплекса.

5. Применимость разработанного метода, алгоритма и программного модуля для оптимизации проектных параметров сетчатых анизотридных конструкций по массе с ограничениями по прочности, жесткости и устойчивости.

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 методу и алгоритму, предложенным в диссертационной работе, с результатами расчетов других исследователей и известных аналитически решений.

Основные положения и отдельные результаты диссертационной работы были опубликованы, докладывались и обсуждались на научно-практических конференциях и семинарах: III Всероссийская конференция «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций», 2014 (г. Новосибирск); IV Всероссийская научно-практическая конференция «Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах», 2016 (г. Новокузнецк); IX всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», 2016 (г. Томск); XIII Всероссийская научная конференция «Краевые задачи и математическое моделирование», 2016 (г. Новокузнецк); XX Юбилейная международная научно-практическая конференция, посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева «Решетневские чтения», 2016 (г. Красноярск); VI Международная молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2016», 2016 (г. Томск); XLI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства, 2017 (г. Москва); III Международная конференция и молодежная школа "Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2017)", 2017 (г. Самара).

Личный вклад автора: Личный вклад автора заключается в формулировке цели и идеи диссертационного исследования, определении его программы, в постановке задачи оптимизации анизотридной конструкции по массе с множеством ограничений, в разработке математической модели задания границ области допустимых решений поставленной задачи в виде обобщенного R-предиката, в разработке

алгоритма минимизации нелинейной целевой функции с учетом большого числа ограничений по модели упругого симплекса.

При непосредственном участии автора разработано программное обеспечение для дискретного моделирования сетчатых анизотридных конструкций и решения задач статики и устойчивости.

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 математической модели задания границ области допустимых решений задачи оптимизации – 80%, в разработке алгоритма минимизации нелинейной целевой функции с учетом большого числа ограничений по модели упругого симплекса – 80%, в постановке задачи оптимизации анизотридной конструкции по массе с множеством ограничений – 100%, в проведении численных экспериментов – 80%, в анализе и обобщении полученных результатов – 100%, в формулировке выводов и положений, выносимых на защиту – 100%, в разработке программного обеспечения, реализующего алгоритм минимизации нелинейной целевой функции с учетом большого числа ограничений по модели упругого симплекса – 100%, в разработке и реализации программного обеспечения расчета напряженно-деформированного состояния и устойчивости анизотридных конструкций – 15%, во внедрении результатов – 25%. Соавторы не возражают против использования совместных результатов в диссертации.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 19 печатных работах, из них 5 – в рецензируемых периодических изданиях из перечня ВАК.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка используемой литературы из 127 наименований и 3 приложений. Общий объём основной части составляет 151 страница и включает 49 рисунков и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе представлена схема оптимального проектирования силовых конструкций, её роль в оптимизационных расчетах. Приведено описание различных типов оптимизации и применяемые методы: топологической (структурной) и параметрической оптимизации. Представлен обзор основных методов оптимального проектирования.

Описаны традиционно применяемые критерии и ограничения при оптимизации силовых конструкций, показаны особенности оптимального проектирования анизотридных композитных конструкций.

Важным аспектом решения оптимизационных задач является программное обеспечение. Методы топологической и параметрической оптимизации реализованы в программных комплексах: ABAQUS, ANSYS (AnsysDesignXplorer, AnsysOptimetrics), NASTRAN, T-FlexCAD и других пакетах. Однако, реализованные в описанных пакетах прикладных программ численные методы оптимизации не учитывают особенности современных конструкций, например анизотридных сеток, требующих выполнения десятков тысяч ограничений, включающих геометрические размеры структурных элементов и параметры состояния.

Для анизотридных силовых конструкций основным критерием оптимального проектирования является минимум массы конструкции. Основными формами разрушения для таких конструкций при нагружении являются разрушение спиральных ребер при сжатии, общая потеря устойчивости и местная потеря устойчивости участков спиральных ребер между узлами пересечения ребер, поэтому в качестве ограничений в задаче оптимизации рассматриваются ограничения по прочности, жесткости и местной и общей устойчивости. Данные ограничения выражаются через параметры напряженно-деформированного состояния конструкции при расчетных нагрузках, которые, в свою очередь, зависят от варьируемых проектных параметров конструкции. Ограничения по прочности и жесткости должны формулироваться для достаточно большого числа характерных точек конструкции. Применительно к анизотридным сеткам, таких точек может быть несколько тысяч. Таким образом, в формулировку задачи может входить большое число ограничений, на несколько порядков превышающее число варьируемых параметров. Данная особенность является определяющей для выбора метода.

Аналитические оценки оптимального проектирования существуют лишь для конкретных видов конструкций. Так Разиным А.Ф. были получены аналитические оценки ограничений по прочности, местной, общей и осесимметричной устойчивости для цилиндрической сетчатой конструкции регулярной структуры без обшивки.

При проведении оптимизационных расчетов анизотридных конструкций также используют численные модели. Расчет напряженно-деформированного состояния и особенно критических нагрузок потери устойчивости представляет собой сложную задачу, требующую существенных затрат компьютерного времени. Выделяют континуальный и дискретный подходы. Так континуальные модели использовались в работах В.А. Бунакова, В.В. Васильева, В.А. Никитюка, А.Ф. Разина и В.В. Федорова и продолжают использоваться при создании сетчатых конструкций регулярной структуры. Применение континуальных моделей

при расчете напряженно-деформированного состояния конструкций с нерегулярной сеткой дает значительное расхождение с данными натурального эксперимента в отличие от дискретного моделирования. Дискретный подход использовался в работе В.П. Полиновского для проектирования сетчатого отсека космического летательного аппарата с учетом минимизации его массы.

Представленные особенности затрудняют применение классических методов нелинейного программирования к задаче оптимизации анизотридных конструкций, что определяет актуальность этой задачи. На основе выполненного аналитического обзора формулируется цель и ставятся задачи диссертационной работы.

Во второй главе «Задача оптимального проектирования анизотридных конструкций с ограничениями по прочности, жесткости и устойчивости» представлена разработанная математическая модель объекта оптимизации (конструкции), в которой варьируемыми факторами выступают конструктивные параметры (размеры конструктивных элементов), а откликами – функции, определяющие массу и запасы по прочности, жесткости и устойчивости. Для определения переменных состояний конструкций используется дискретный подход (метод конечных элементов).

В области допустимых решений Ω , принадлежащей n -мерному пространству варьируемых проектных параметров x_i , требуется найти точку x с координатами (x_1, x_2, \dots, x_n) , в которой функция массы n переменных принимает минимальное значение:

$$z(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min_{\Omega \in R^n}, \quad (1)$$

где $z(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – целевая функция, x_i – варьируемые проектные параметры конструкции, Ω – область допустимых решений, определяемая системой из N ограничений-неравенств структурных параметров и параметров состояния конструкции.

Область ограничений имеет вид:

$$\Omega: \begin{cases} \omega_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0, \\ \omega_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0, \\ \dots \\ \omega_N(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0, \\ x_1 > 0, \\ x_2 > 0, \\ \dots \\ x_n > 0. \end{cases} \quad (2)$$

Область допустимых решений (2) для задачи оптимального проектирования сетчатых анизотридных конструкций, с учетом

безразмерности функций ограничений (условий по прочности, жесткости, общей и местной устойчивости) записывается в виде:

$$\Omega: \begin{cases} \frac{\sigma_{кр} - \sigma_i(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\sigma_{кр}} \geq 0, \\ \frac{u_{кр} - u_i(x_1, x_2, \dots, x_n)}{u_{кр}} \geq 0, \\ 1 - \lambda_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0, \\ x_j > 0. \end{cases} \quad (3)$$

где $\sigma_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – напряжения в i конечном элементе, $\sigma_{кр}$ – прочность материала, $u_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – перемещения в i конечном элементе, $u_{кр}$ – жесткость конструкции, $\lambda_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – собственные числа.

Таким образом, при полном дискретном моделировании силовых сетчатых аназогидных конструкций число учитываемых ограничений в задаче оптимизации по массе в несколько раз превышает число конечных элементов дискретной модели.

Для решения поставленной задачи оптимизации предложено использовать метод симплексного поиска, кусочно-гладкую границу области допустимых решений предлагается заменить на один гладкий R-предикат. Для определения гладкой аппроксимации использовать аппарат R-функций.

В третьей главе описан разработанный численный метод расчета минимума целевой функции на основе симплексного поиска.

Метод симплексного поиска является безусловным и использование его для задачи с большим числом ограничений сталкивается с невозможностью выбора направления дальнейшего движения, из-за невозможности оценить какому ограничению принадлежит промежуточное решение. Для решения данной проблемы предлагается использовать вместо кусочно-гладкой области границы области допустимых решений ее гладкую аппроксимацию. Для получения аппроксимации используется аппарат R-функций.

В силу того, что значения каждой функции ограничений из области допустимых решений определяет меру расстояния текущей точки от соответствующего участка границы на каждом шаге поиска строится частичный предикат, используя несколько наименьших функций – доминантных ограничений. Для учета ограничений вводится вспомогательная целевая функция, максимальное значение которой определяет наихудшую вершину симплекса. Показано, что безусловный минимум такой функции совпадает с условным минимумом исходной целевой функции на границе области допустимых решений.

При реализации данного алгоритма возникли проблемы в углах области допустимых значений и при наличии кратных границ. Поэтому для корректировки движения симплекса применяется корректировка

направления. Каждая доминанта заменяется упругой связью, в физическом смысле представляемой в виде пружины (рисунок 1), и направление перемещения симплекса корректируется с учетом суммы реакции этих связей.

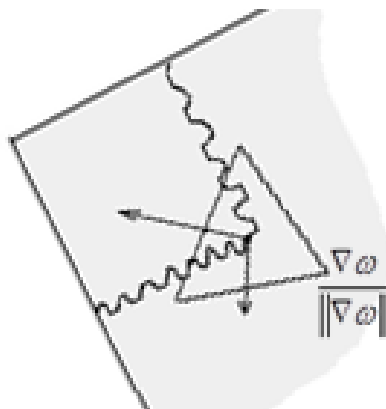


Рисунок 1 – Вычисление измененной целевой функции

Для вычисления реакции связей, решается двухэтапная задача:

$$\begin{aligned} Ku' &= -\nabla z \\ K * u &= -\nabla z' \end{aligned} \quad (4)$$

в которой матрица K – суммарная матрица жесткости пружин.

Матрица K является вырожденной, если количество учитываемых ограничений меньше размерности пространства – тогда направление симплекса определяют свободная часть решения. В случае если количество ограничений соответствует размерности пространства – симплекс находится в углу области ограничения допустимых решений. Второе уравнение системы (4) использует полученные значения реакций связей, таким образом, кратные границы учитываются как единая связь.

В данной главе представлены этапы и общая схема алгоритма решения задачи оптимизации проектных параметров сетчатых анизотридных конструкций по массе с ограничениями на структурные параметры и переменные состояния (рисунок 2).

Проверка работоспособности алгоритма рассматривалось его применение на шести тестовых задачах, имеющих точное аналитическое решение, в том числе задаче определения оптимальных параметров поперечного сечения консольной балки при фиксированном и переменном значении высоты сечения. Во всех тестовых случаях поиск сходится к точному решению, причём процесс поиска устойчив к возмущениям параметров задачи.

В четвёртой главе описан модуль пакета программ «Композит НК Анизотрид», реализующий алгоритм оптимального проектирования силовой конструкции с ограничениями по прочности и устойчивости.

Пакет программ «Композит-НК Анизотрид» содержит модули решения задачи прочности и устойчивости силовых конструкций. Пакет программ представляет собой инструментарий для конструирования

прикладных программ с использованием технологии визуального программирования, где алгоритм расчета представлен как последовательность вычислений значения функциональных объектов. При этом в качестве аргументов данных объектов выступают другие функциональные объекты. Каждый функциональный объект реализует конкретную подпрограмму.

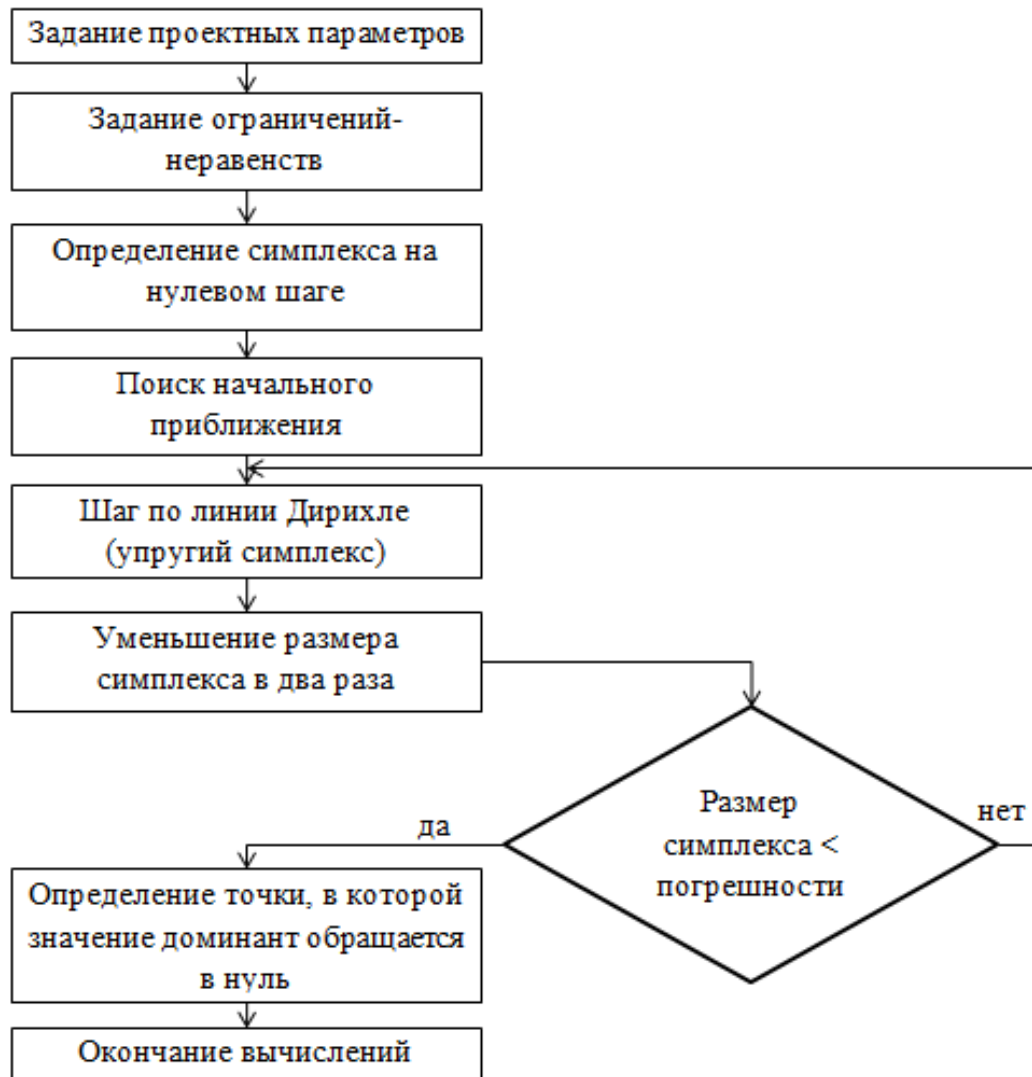


Рисунок 2 – Общая схема алгоритма

Пакет программ «Композит-НК Анизогрид» расширен модулем оптимизации, схема пакета программ с учетом модуля представлена на рисунках 3 и 4. Приложение подразумевает загрузку файла данных, содержащего размерность факторного пространства, первоначальный размер симплекса, начальную точку алгоритма симплексного поиска и коэффициенты при аргументах целевой функции и функций ограничений.



Рисунок 3 – Схема ПП «Композит НК Анизогрид» после внедрения модуля

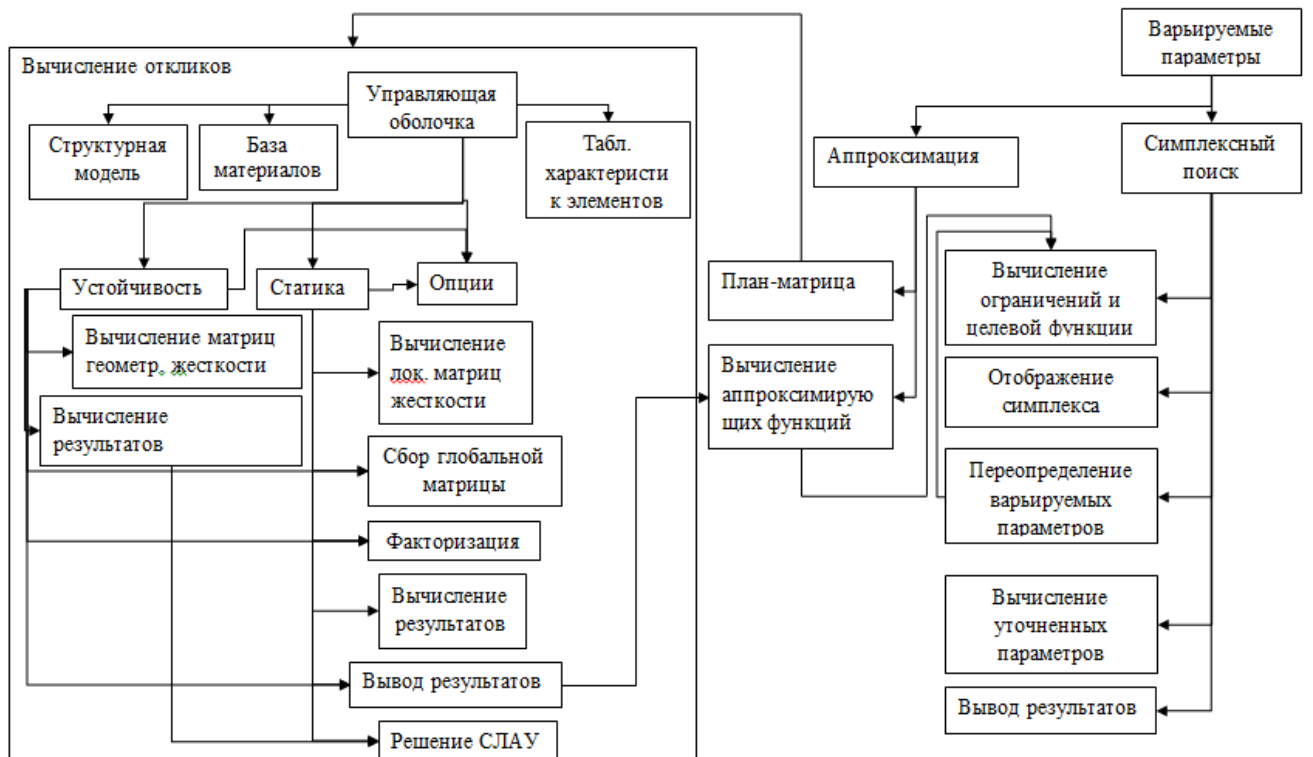


Рисунок 4 –Схема ПП «Композит НК Анизогрид» после внедрения модуля

Для интеграции алгоритма симплексного поиска в пакет программ «Композит НК Анизотрид» была построена функциональная схема (рисунок 5) предусматривающая автоматическое выполнение всех шагов алгоритма, причем вид функций ограничений и целевой функции загружается в виде файла входных данных в функциональных объектах «Функции», а параметры расчета – минимальное значение размера симплекса, параметры R-конъюнкции, вектор параметров оптимизации – загружаются в функциональном объекте «Опции». Вычисление коэффициентов ограничений и целевых функций выполняются на основе расчетов напряженно-деформированного состояния и расчета устойчивости, выполняемого в модулях пакета программ согласно план-матрице варьируемых факторов.

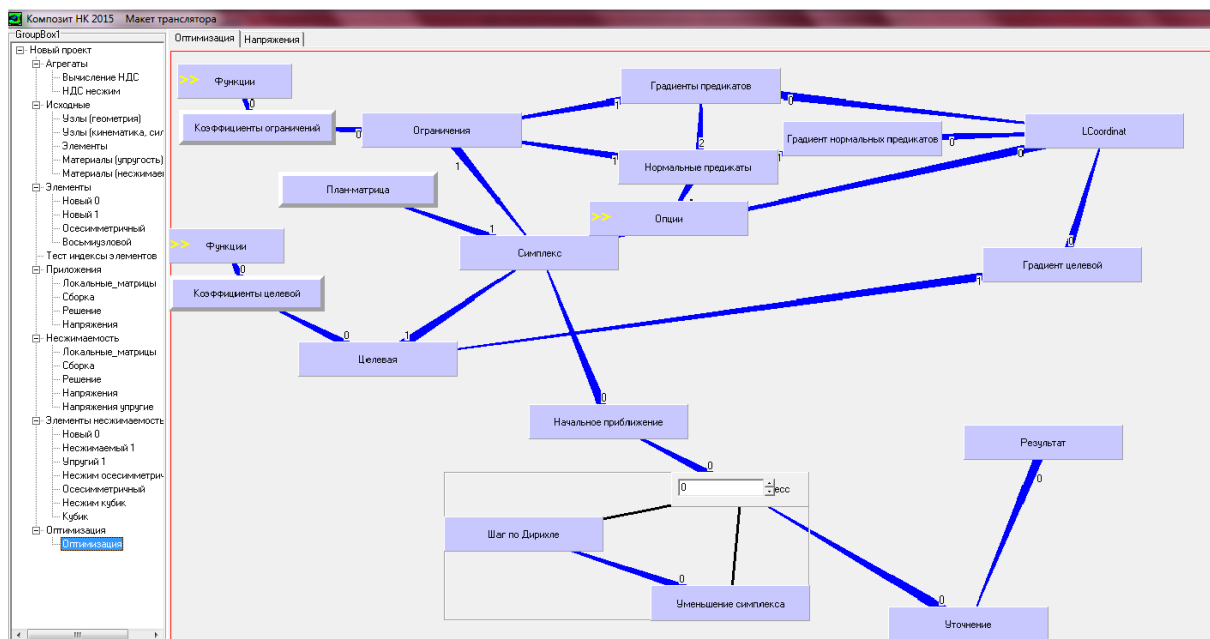


Рисунок 5 –Функциональная схема оптимизационного расчета

В пятой главе представлено решение задачи оптимизации сетчатых оболочечных конструкций по массе, имеющих как регулярную, так и нерегулярную структуру. Применимость алгоритма для решения задачи оптимального проектирования сетчатых конструкций регулярной структуры показана на примере цилиндрической и конической оболочек без обшивки. Для расчета цилиндрической оболочки в качестве функций ограничений рассматривались известные аналитические зависимости А.Ф. Разина, а оптимизационный расчет для конической оболочки проведен на основе результатов расчета напряженно-деформированного состояния и устойчивости с помощью вычислительного эксперимента в пакете «Композит НК Анизотрид».

Типовая сетчатая конструкция характеризуется толщиной сетчатой структуры h , толщинами спиральных и кольцевых ребер δ_c и δ_k ,

расстояниями между спиральными ребрами a_c (по нормали к оси ребра) и между кольцевыми ребрами a_k , углом наклона спиральных ребер (по отношению к образующей). Для моделирования данной оболочки используются формулы В.А. Бунакова, описывающие оптимальный цилиндр, которые позволяют сократить число варьируемых параметров до 4 – угла наклона спирального ребра φ , количества пар спиральных ребер mh , высоты реберной структуры h и ширины сечения спирального ребра δ_c . Площадь кольцевого ребра вычисляется исходя из континуального моделирования. Целевую функцию представляется в виде суммы масс спиральных и кольцевых ребер:

$$M = 2\pi RLh\rho_h(2m_h\bar{\delta}_h + m_c\bar{\rho}_c\bar{\delta}_c), \quad (5)$$

где $\bar{\delta}_c = \frac{\delta_c}{a_c}$, $\bar{\delta}_h = \frac{\delta_h}{a_h}$, $\bar{\rho}_c = \frac{\rho_c}{\rho_h}$ - плотность материалов ребер.

В качестве ограничений используем функции А.Ф. Разина: ограничение по прочности ребер $|\sigma_c| \leq \bar{\sigma}_c$:

$$P \leq \bar{P} = 2\pi Dh\bar{\delta}_c c^2 \bar{\sigma}, \quad (6)$$

ограничение по общей устойчивости:

$$P \leq P_{кр} = \frac{4\pi\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E_c \bar{\delta}_c h^2 c^2 s^2 \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{E_k \bar{\delta}_k}{2E_c \bar{\delta}_c s^4}}}, \quad (7)$$

ограничение по осесимметричной устойчивости:

$$P \leq P_{кр}^o = 2\pi \sqrt{\frac{2}{3}} h^2 c^2 \sqrt{E_c E_k \bar{\delta}_c \bar{\delta}_k}, \quad (8)$$

ограничение по местной устойчивости:

$$P \leq P_{кр}^M = \frac{2}{3} \pi^3 k E_c D h \bar{\delta}_c^3 c^4 s^2. \quad (9)$$

В таблице 1 представлены результаты оптимизации по массе сетчатой конструкции цилиндрической формы. Под номером 1 обозначены результаты проектного расчета по аналитическим зависимостям А.В. Азарова по выбору оптимальных параметров при действии сжимающих нагрузок, под номером 2 – результаты расчета параметров методом перебора по аналитическим зависимостям А.Ф. Разина. Под номерами 3 и 4 – результаты применения рассматриваемого алгоритма с ограничениями при фиксированном и переменном числе пар спиральных ребер соответственно.

Расхождения с результатами, представленными в работе Исеевой О.А., Кравченко Ю.С., Савицкого В.В., Крушеко Г.Г., Пацковой Е.Г.

«Выбор оптимальной конфигурации при проектировании анизогридных конструкций» (Решетневские чтения, 2016 г., г. Красноярск) объясняются тем, что расчетные формулы (6)-(9) не учитывают ограничения по жесткости, принятые в статье и в вычислениях значение ширины сечения кольцевого ребра вычисляется исходя из континуального проектирования. Модель, полученная в результате симплексного поиска, обладает меньшей массой, чем исходная модель, при выполнении ограничений на прочность и устойчивость.

Таблица 1 – Результаты оптимального проектирования

Номер расчета	Результаты оптимизационного расчета					Объем V, м ³	Напряженно-деформированное состояние				
	φ	m_h	h, мм	δ_h , мм	δ_c , мм		σ_{\min} , кгс/мм ²	σ_{\max} , кгс/мм ²	u_s , мм	u_n , мм	λ
1	24,5	32	21	6	3	429,9	-26,4	7,1	6	1,8	0.0122
2	36	32	14	4	1	665,9	-67,9	50,8	31	11,5	0.017
3	39	32	4	8	3,5	130,9	-70,4	55,33	54,8	13,2	0.0122
4	38,5	49	4	5,5	3	177,8	-44,8	39,5	43,1	8,2	0.0111

Решалась задача оптимизации по массе переходного отсека, предназначенного для обеспечения механического интерфейса между ракетой-носителем и космическим аппаратом, и состоящем из гладкой или подкрепленной конической оболочки и стыковочных шпангоутов. Коническая оболочка имеет вид анизогридной оболочки с регулярной структурой ребер. Для вектора варьируемых параметров p ограничения будут иметь вид:

$$\begin{cases} |\sigma(p)| \leq \sigma_{кр}, \\ p_i \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

где p_i – набор варьируемых параметров, $\sigma_{кр}$ – предел прочности материала, $\sigma(p_i)$ – максимальные значения напряжений в спиральных и кольцевых ребрах при текущем наборе параметров.

Значения откликов для получения функций ограничений получены с помощью пакета программ «Композит НК Анизогрид», с использованием дискретных моделей конического адаптера (рисунок б).

Решалась двумерная задача оптимизации при постоянных геометрических значениях размеров сечений: $h = 25\text{мм}$, $\delta_h = 4\text{мм}$ и $\delta_c = 4\text{мм}$. На рисунке 7а изображены линии уровня целевой функции и область допустимых значений в плоскости $\varphi - m_h$. Траектория движения симплекса показана на рисунке 7 б.

Результат работы алгоритма сходится к точке с параметрами $\varphi = 50.2^\circ$ и $m_h = 42.6$. С учетом геометрического смысла параметров полученные значения скорректированы к значениям $\varphi = 50^\circ$ и $m_h = 43$.

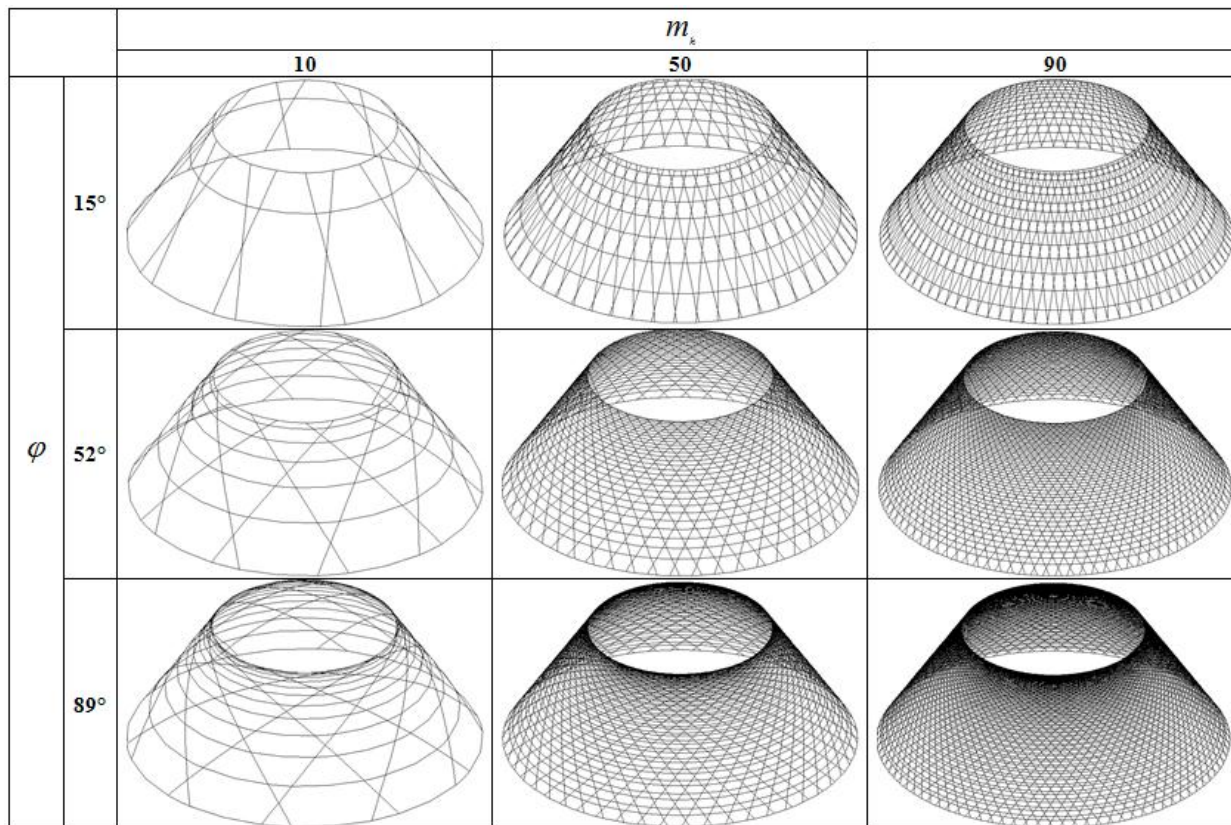
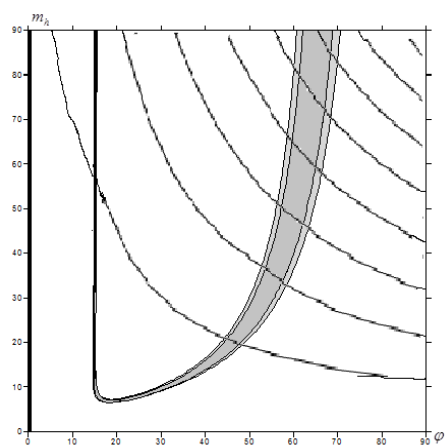
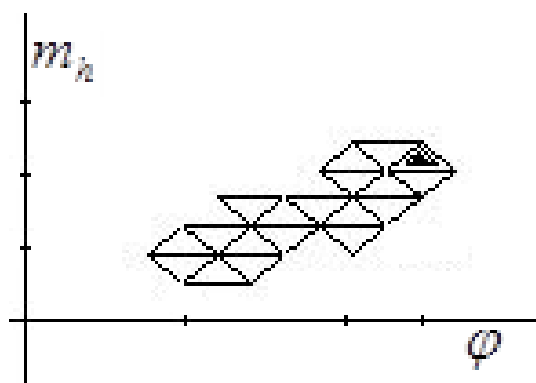


Рисунок 6 – Вид сетчатой структуры, в зависимости от угла наклона спиральных ребер φ и количества спиральных ребер m_h



а)



б)

Рисунок 7 – Область допустимых значений (а) и траектория движения симплекса (б) при $h = 25\text{мм}$, $\delta_h = 4\text{мм}$ и $\delta_c = 4\text{мм}$.

Рассматривалась задача оптимизации геометрических параметров

сетчатой структуры конического адаптера: толщина структуры (высота сечений ребер) h , толщины спиральных и кольцевых ребер δ_h и δ_c . В качестве откликов вычислительного эксперимента будут рассматриваться максимальные значения напряжений в спиральных σ_{\min} и кольцевых σ_{\max} ребрах, первые значения собственных чисел λ_1 , λ_2 и λ_3 .

В таблице 2 представлены результаты оптимизационных расчетов для данной задачи при различных видах целевой функции и функций ограничений. Учитывая физический смысл варьируемых параметров целесообразно использовать в качестве функций ограничений обратно пропорциональные функции.

При достижении размера симплекса меньше заданного порядка (10^{-6}) полученное решение удовлетворяет ограничениям по прочности и габаритным размерам. Расчет на устойчивость конструкции так же показывает, что найденные параметры удовлетворяют условию устойчивости (значения собственных чисел не превосходит 1). В связи с ограничениями накладываемыми технологией производства, вектор полученных параметров требует корректировки в пределах области ограничений, с учетом целевой функции

Таблица 2– Результаты оптимизационных расчетов

Вид ограничений	Вид целевой функции	Значения проектных параметров		
		h	δ_h	δ_c
Линейные функции	Нелинейная форма	9,7	7	5
Функции второго порядка	Линейная форма	10,28	5,28	2,5
Обратные функции	Линейная форма	13,3	3,6	1,6
	Нелинейная форма	13,1	3,6	1,6

Вычислительные возможности и машинные ресурсы следует учитывать при постановке задачи, при выборе вида аппроксимации целевой функции и функций ограничений на каждой итерации алгоритма.

Приведено решение задачи оптимизации по массе для сетчатой оболочечной конструкции с нарушениями регулярной структуры. В силу того, что при наличии вырезов в спиральных ребрах наблюдаются в том числе и напряжения растяжения, а в кольцевых – напряжения сжатия, а кроме того нужно учитывать напряжения в обшивке конструкции, количество ограничений значительно возрастает.

Конструкция представляет собой сетчатую цилиндрическую оболочку с двумя шестиугольными некомпенсированными вырезами, имеющую однослойную обшивку. В качестве параметров оптимизации рассмотрим высоту выреза a_n , ширину выреза b_n и расстояние между

вырезами δ_n . Общий вид конструкции представлен на рисунке 8.

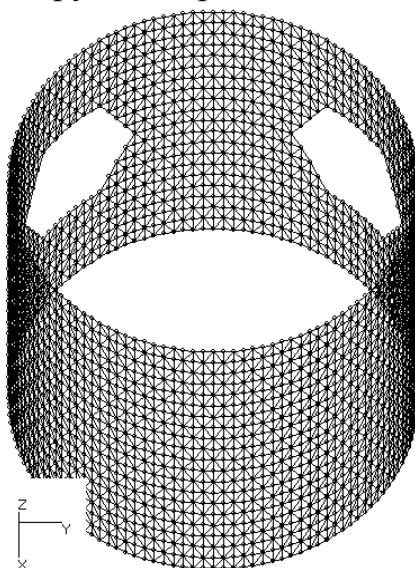


Рисунок 8 – Общий вид оребренной оболочки с двумя шестиугольными вырезами

Результатом работы алгоритма симплексного поиска является вектор: $(7,4; 5,45; 4,15)$. С учетом того, что параметрами являются размеры выреза в элементарных ячейках сетчатой структуры, их значения должны быть целочисленными. Таким образом, решением задачи оптимизации анизотридной конструкции с нарушением регулярной структуры является: расстояние между вырезами равно 8 элементарным ячейкам, ширина выреза – 6 элементарных ячеек и высота выреза – 4 элементарных ячейки. При этом значения максимальных напряжений не превышают критических значений по прочности конструкции и являются минимальными среди результатов численных расчетов в вычислительном эксперименте.

В диссертационной работе получены следующие основные результаты.

1. Сформулирована постановка задачи оптимизации анизотридной конструкции по массе, в которой ограничения на структурные параметры и параметры состояния конструкции в виде неравенств приводятся к нормализованным R-предикатам границ, дающим оценку расстояния от пробной точки до границы.

2. Построена математическая модель объекта оптимизации посредством задания границы области допустимых решений задачи оптимизации, в виде аппроксимации кусочно-гладкой границы аппаратом R-функций.

3. Разработан численный метод расчета минимума целевой функции на основе симплексного поиска, в котором множество кусочно-гладких

границ области допустимых решений заменяется единым выпуклым R-предикатом, а симплекс считается связанным с ближайшими границами посредством упругих связей, реакции которых влияют на направление поиска.

4. Разработан новый алгоритм оптимизации проектных параметров сетчатых анизотридных конструкций по массе с большим количеством ограничений по модели упругого симплекса.

5. Результаты решения тестовых задач подтвердили сходимость последовательности приближенного решения разработанного численного метода оптимизации к искомому решению. Результаты численного расчета согласуются с аналитическими решениями.

6. На базе пакета программ «Композит-НК Анизотрид» разработан модуль оптимизации, который предусматривает автоматическое выполнение всех шагов алгоритма оптимизации с учетом множества ограничений.

7. Результаты диссертации внедрены в ОАО ЦНИИСМ и используются для оптимального проектирования силовых анизотридных композиционных конструкций нерегулярной структуры, что подтверждено справкой о внедрении.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах.

В изданиях, рекомендованных ВАК

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

2. Интерпретация данных натурных испытаний оболочечной композитной конструкции при статическом осевом сжатии / Каледин В.О., Разин А.Ф., Бурнышева Т.В., Штейнбрехер О.А. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2015. – №3. Том 81. – С. 53-58.

3. Алгоритм оптимизации многоэлементных конструкций с ограничениями по прочности и габаритам / Каледин В.О., Штейнбрехер О.А. // Научно-технический вестник Поволжья, 2016. – №3. – С. 113-115.

4. Бурнышева Т.В., Штейнбрехер О.А. Рациональное проектирование толщины окантовки люков конструкции отсека космического летательного аппарата. Инженерный журнал: наука и инновации, 2017, вып. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-9-1671>

5. Штейнбрехер О.А., Бурнышева Т.В. Решение задачи параметрической оптимизации сетчатой цилиндрической конструкции. Инженерный журнал: наука и инновации, 2017, вып. 10. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-10-1688>

В прочих изданиях

6. Подбор оптимального расположения ребер в сетчатой структуре лонжерона / Штейнбрехер О.А. // Современные методы механики: матер. Междунар. конф. (19-20 сентября 2012 г.). – Томск: Изд-во Том.ун-та, 2012. – С. 100.

7. Применение ППП «Композит-НК» как инструмента вычислительного эксперимента / Бурнышева Т.В., Штейнбрехер О.А. // Современные проблемы математики и механики: Материалы III Всероссийской молодежной научной конференции – Томск: Изд-во Том.ун-та, 2012. – С. 381-385.

8. Численный расчет напряженно-деформированного состояния оболочек сложной структуры / Бурнышева Т.В., Штейнбрехер О.А. // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева: Математические технологии, 2013. – С. 124-129.

9. Задача оптимизации сетчатых оболочек из композиционных материалов / Штейнбрехер О.А. // Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций: сборник материалов III Всерос. конф., посвященной 100-летию со дня рождения академика Ю.Н. Работнова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – С. 117-118.

10. Применение вычислительного эксперимента при расчете напряженно-деформированного состояния конического адаптера / Бурнышева Т.В., Штейнбрехер О.А., Ульянов А.Д. // Краевые задачи и математическое моделирование, Новокузнецк, 2014. – С. 33-43.

11. О решении задачи оптимизации сетчатых конструкций / Штейнбрехер О.А. // Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах: труды IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Новокузнецк, 12-15 апреля 2016г., СибГИУ. Новокузнецк, Изд-во Сибирский государственный индустриальный университет, 2016. – С. 149-154.

12. Определение оптимальных параметров сетчатой конической конструкции при критерии минимума массы и соблюдения условий на прочность / Каледин В.О., Штейнбрехер О.А., Бурнышева Т.В. // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2016): Сборник трудов IX всероссийской научной конференции, 21-25 сентября 2016 года, г. Томск. – Томск: Томский государственный университет, 2016. – С. 462-464.

13. Дискретное моделирование сетчатой конической оболочки / Бурнышева Т.В., Штейнбрехер О.А. // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2016): Сборник трудов IX всероссийской научной конференции, 21-25 сентября 2016 года, г. Томск. – Томск: Томский государственный университет, 2016. – С. 445-447.

14. Поиск оптимальных конструктивных параметров сетчатой цилиндрической оболочки / Каледин В.О., Штейнбрехер О.А., Бурнышева Т.В. // Решетневские чтения: материалы XX Юбилейной междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (09-12 нояб. г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т – Красноярск, 2016. – Ч.1. – С. 33-34.

15. Расчет напряженно деформированного состояния анизотридного адаптера/ Бурнышева Т.В., Штейнбрехер О.А. // Решетневские чтения: материалы XX Юбилейной междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (09-12 нояб. г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т – Красноярск, 2016. – Ч.2.– С. 118-120.

16. Алгоритм оптимизации анизотридных конструкций по массе при произвольном числе нелинейных ограничений / Штейнбрехер О.А. // VI Международная молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2016»: материалы конференции - Томск, 2016 – С. 43-44.

17. Решение задачи параметрической оптимизации сетчатой цилиндрической конструкции / Штейнбрехер О.А., Бурнышева Т.В. // XLI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов – Москва: МГУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – С. 40-41.

18. Определение оптимальных параметров сетчатой конической конструкции при критерии минимума массы / Штейнбрехер О.А. // Краевые задачи и математическое моделирование: темат. сб. науч. тр. – Новокузнецк, 2017. – С. 212-217.

19. Применение математического моделирования в проектировании анизотридных сетчатых силовых конструкций нерегулярной структуры / Каледин В.О., Бурнышева Т.В., Штейнбрехер О.А. // Сборник трудов III международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017) (25-27 апреля 2017, г. Самара), Самара: Новая техника, 2017. С. 1051-1058.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
Подписано в печать «27» марта 2018 г. Формат 60x84 $\frac{1}{16}$.

Бумага писчая. Ризография.
Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз.

Новокузнецкий институт (филиал)
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения
высшего образования
«Кемеровский государственный университет»

654000, г.Новокузнецк, пр. Metallургов, 19, тел. (3843) 74-15-41
Центр издательской деятельности