

экз. №

На правах рукописи



ЛЕВЧЕНКОВ МИХАИЛ ДМИТРИЕВИЧ

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ СЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ПЛАНЕРА СО СТРУКТУРНОЙ НЕРЕГУЛЯРНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ МНОГОУРОВНЕВЫХ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ

2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

г. Жуковский – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФГУП «ЦАГИ»).

Научный руководитель: Шаныгин Александр Николаевич,
кандидат технических наук,
ФГУП «ЦАГИ»,
начальник лаборатории прочности перспективных
авиационных конструкций НИО-3

Официальные оппоненты: Ефимов Вадим Викторович,
доктор технических наук, доцент
Московский государственный технический
университет гражданской авиации (МГТУ ГА)
профессор кафедры аэродинамики, конструкции и
прочности летательных аппаратов

Склезнев Андрей Анатольевич,
доктор технических наук, доцент
АО "Центр перспективных разработок",
директор

Ведущая организация: АО «РЕШЕТНЁВ»

Защита состоится «23» декабря 2025 года в _____ на заседании диссертационного совета Д 403.004.01 на базе ФГУП «ЦАГИ» по адресу: 140180, Московская область, г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1, ЦАГИ, конференц-зал инженерного корпуса.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «ЦАГИ» и на сайте www.tsagi.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 403.004.01,
доктор физико-математических наук,
доцент

М.А. Брутян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Выполнение постоянно ужесточающихся требований по безопасности, комфорту и экологии, предъявляемых к пассажирским самолетам, приводит к увеличению взлетного веса, которое необходимо компенсировать в том числе и за счет снижения веса планера. За более чем пятидесятилетнюю эволюцию металлические конструкции пассажирских самолетов практически исчерпали свой потенциал к повышению прочностных характеристик и снижению веса планера. Композитные высоконагруженные авиаконструкции на основе подкрепленных ламинатных обшивочных КСС (типа «Black metal»), используемые в крыле и фюзеляже самолетов B-787 и A-350, не продемонстрировали возможность реального снижения веса планера. В первую очередь из-за наличия ряда критических проблем обеспечения прочности композитных ламинатных обшивок. Проблемы обусловлены низкими деформационными и прочностными свойствами современных пластиков, используемых в качестве связующего, и многоуровневой гетерогенностью ламинатной структуры, порождающей множественные концентрации напряжений в связующем, которые невозможно компенсировать без значительных весовых затрат.

В настоящее время в качестве перспективных КСС для силовых конструкций планера рассматриваются КСС на основе однонаправленных композитных структур, имеющих более низкий уровень концентрации напряжений на мезоуровне, что позволяет увеличить значения допускаемых предельных деформаций, приведенных на рисунке 1.

КСС типа «black metal»,
реализованная в отсеке фюзеляжа B-787



Оболочка фюзеляжа с сетчатой КСС,
реализованная в АО «ЦНИИСМ»



Расчетные значения деформаций
квазиизотропных слоистых КП

$$\epsilon_{\text{доп растяж}} = 0.45 \%$$

$$\epsilon_{\text{доп сжат}} = 0.3 \%$$

$$\gamma_{\text{доп}} = 0.5 \%$$

Расчетные значения
деформаций
однонаправленных
композитных структур

$$\epsilon_{\text{доп растяж}} \rightarrow 0.9 - 1.1 \%$$

$$\epsilon_{\text{доп сжат}} \rightarrow 0.6 - 0.7 \%$$

$$\gamma_{\text{доп}} \rightarrow 0.7 \%$$

Рисунок 1 – Предельные значения деформации в обшивочных и реберных (сетчатых) КСС.

К настоящему времени выполнен достаточно большой объем исследований по оценке прочностных, жесткостных и массовых характеристик сетчатых композитных конструкций планера пассажирских самолетов. Здесь следует отметить работы по адаптации сетчатых композитных конструкций, получивших широкое развитие в космической отрасли, к авиационным требованиям и ограничениям, выполненным в ряде международных проектов: FP7 «ALaSCA», FP7 «PoLaRBEAR», «КМ-Фюзеляж». Данные работы проводились при координации ЦАГИ совместно

с ЦНИИСМ и рядом ведущих российских и европейских научных центров, университетов и авиационных фирм. В данных исследованиях было показано, что композитные сетчатые цилиндрические отсеки, проектируемые по нормам и требованиям гражданского самолетостроения, могут иметь лучшие прочностные характеристики, позволяющие снизить вес силовых отсеков фюзеляжа до 12-15 % по сравнению с металлическими аналогами и до 11-14 % по сравнению с отсеками типа “Black metal”. В настоящее время, помимо сетчатых конструкций фюзеляжа, объектом исследований становятся сетчатые структуры панелей, лонжеронов и нервюр крыла.

Следует отметить, что большинство рассматриваемых в настоящее время композитных сетчатых отсеков имеют регулярную структуру, которая формируется на основе повторяющихся типовых фрагментов (ячеек) реберного каркаса, включающего кольцевые, спиральные и иногда продольные ребра (Рисунок 2).



Рисунок 2 – Конструкции композитных отсеков с регулярной реберной структурой

Регулярные сетчатые структуры достаточно просты для изготовления и рациональны для значительной части конструкций космической отрасли, однако применительно к авиационным конструкциям регулярные сетчатые структуры имеют ряд недостатков, не позволяющих им в большей степени реализовать имеющийся потенциал по обеспечению лучших прочностных, жесткостных и как следствие массовых характеристик сетчатых конструкций планера. Эти недостатки обусловлены наличием избыточных запасов прочности и устойчивости для реберного каркаса из-за постоянства жесткостных характеристик вдоль продольного и поперечного направлений при изменении величин изгибающих моментов и перерезывающих сил вдоль этих направлений. К сожалению, в настоящее время из-за низких прочностных и деформационных свойств современных связующих невозможно варьировать площадь сечений ребер по длине отсека без значительного снижения его прочности и, как следствие, значительных весовых затрат. По этой причине в рамках регулярных сетчатых композитных структур применительно к отсекам крыла и фюзеляжа трудно реализовать эти запасы для снижения веса отсеков или увеличения их жесткости.

В настоящей работе предлагается добиться гармонизации значений прочностных параметров сетчатых отсеков с уровнем внешнего нагружения за счет изменения взаимного расположения спиральных ребер по длине и в поперечном направлении отсека фюзеляжа и панелей крыла, т.е. за счет создания рациональных с точки зрения восприятия внешних нагрузок

нерегулярных сетчатых структур. Для решения этой задачи в диссертации разработан и успешно апробирован новый метод на основе многоуровневой прочностной МКЭ модели. Для реализации этого метода была создана методика, позволяющая на его основе проводить оценку статической прочности сетчатых конструкций планера со структурной нерегулярностью.

В диссертации также исследованы задачи по значительному снижению трудозатратности и времени выполнения комплексного прочностного анализа, которые значительно возросли из-за появления нерегулярности сетчатой структуры. В рамках этих исследований осуществлена разработка нескольких процедур и программ на их основе по повышению производительности вычислений за счет рационального использования некоторых принципов декомпозиции, используемых в рамках разработанного метода, и коммерческих процедур распараллеливания потоков для ЭВМ с многоядерными процессорами, позволяющих обеспечить решение трудоемких практических задач.

Актуальность темы обусловлена

- Необходимостью разработки нового поколения конструкций пассажирских самолетов с лучшими техническими характеристиками и уровнем надежности и комфорта;
- Появлением новых композитных сетчатых авиационных конструкций, имеющих принципиальные отличия в обеспечении прочности и устойчивости;
- Значительным увеличением трудоемкости оценки статической прочности (и устойчивости) сетчатых КСС с нерегулярностью сетчатой реберной структуры;
- Высоким потенциалом однонаправленных композитных структур к созданию на их основе нового поколения легких и надежных композитных конструкций для перспективных пассажирских самолетов.

Степень разработанности темы

Разработка композитных сетчатых конструкций проводится в течение достаточно длительного времени российскими и зарубежными исследователями. Наибольших успехов в реализации данного типа конструкций добились отечественные разработчики и производители применительно к космическим аппаратам. Основные достижения в развитии современных методов расчета и проектирования сетчатых конструкций принадлежат И.Ф. Образцову, В.В. Васильеву, Разину А.Ф., Барынину В.А., Бабичеву А.А., В.А. Бунакову, А.В. Азарову, А.В. Лопатину, Бурнышевой Т.В. Исследования сетчатых структур проводятся в европейских аэрокосмических центрах CIRA (Италия) и DLR (Германия).

Конструкции гражданских космических сетчатых композитных отсеков, серийно производимые Центральным Научно-Исследовательским Институтом Специального Машиностроения (ЦНИИСМ), имеют вес ниже более чем на 25-30 %, чем для металлических аналогов. В ЦНИИСМ был также разработан демонстратор технологии для фюзеляжа самолета Ил-114. Позднее в ЦАГИ совместно с ЦНИИСМ был разработан и создан ряд отсеков фюзеляжа – демонстраторов прочности с регулярной сетчатой структурой, испытания которых подтвердили их

высокие прочностные характеристики и позволили обосновать возможность снижения массы отсека до 10-14 % по сравнению с металлическими и композитными аналогами, имеющими традиционную обшивочную КСС.

В течение последних пятнадцати лет разработка и создание легких и надежных композитных сетчатых отсеков и панелей с регулярной структурой для конструкций пассажирских самолетов стала предметом многих исследований ряда российских и зарубежных научных проектов. В рамках НЦМУ «Сверхзвук», стартовавшего в конце 2020 года, начались исследования с участием автора диссертации по развитию нерегулярных сетчатых структур отсеков фюзеляжа и панелей крыла.

Целью данной работы является:

- Создание универсальной оперативной расчетной методики для оценки прочностных и жесткостных характеристик нерегулярных сетчатых отсеков крыла и фюзеляжа;
- Обоснование улучшения прочностных, жесткостных и массовых характеристик сетчатых отсеков планера за счет изменения угла наклона спиральных ребер сетчатой структуры по длине и в поперечном направлении.

Решены следующие задачи:

- Разработан и апробирован метод гармонизации уровня запасов статической прочности с уровнем внешнего нагружения за счет изменения углов наклона ребер в фюзеляже и крыле с учетом ограничений на прочностные и жесткостные характеристики.
- Получены параметрические зависимости жесткостных, прочностных и массовых характеристик сетчатых отсеков от значений параметров реберной структуры, имеющей нерегулярности.
- Разработана и валидирована трехуровневая параметрическая модель анализа прочности сетчатых отсеков планера с регулярной и нерегулярной сетчатой структурой.
- Разработана оперативная методика и программный алгоритм на её основе оценки жесткостных, прочностных и массовых характеристик сетчатых отсеков со структурной реберной нерегулярностью с использованием автоматизированной многоуровневой МКЭ модели.
- Разработаны процедуры, реализован программный алгоритм на их основе, обеспечивающие значительное снижение временных затрат при проведении оценки прочности нерегулярных сетчатых отсеков за счет использования специальной декомпозиции расчетных МКЭ моделей, используемых в рамках разработанного метода, и методики распараллеливания вычислительных потоков.

Научная новизна

- Новый метод улучшения прочностных и жесткостных характеристик сетчатых отсеков за счет использования нерегулярности сетчатой структуры.
- Новая методика анализа прочности и устойчивости композитных конструкций сетчатых отсеков и панелей с нерегулярной структурой на основе многоуровневых глобально-

параметрических КЭ моделей, реализующая новый метод улучшения прочностных и жесткостных характеристик сетчатых отсеков.

- Новые параметрические зависимости влияния параметров нерегулярности на прочностные характеристики сетчатых структур.

- Расширенная область рациональных параметров сетчатой структуры, обладающей высокой весовой эффективностью для композитной конструкции цилиндрического отсека фюзеляжа и панелей крыла гражданского самолета.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

- Разработанный алгоритм, позволяющий значительно увеличить быстродействие вычислительных процедур, обеспечил практическую возможность осуществить трудоемкую комплексную оценку статической прочности нерегулярных сетчатых конструкций за счет положительной синергетики способа специальной декомпозиции прочностных КЭ моделей, используемых в разработанном методе гармонизации, и коммерческой процедуры распараллеливания вычислительных потоков.

- Разработанные алгоритмы и программное обеспечение были успешно использованы в ряде исследований конструкций перспективных пассажирских самолетов в проектах, организованных Минпромторгом и Минобрнауки, включая НЦМУ «Сверхзвук».

- Полученные в диссертации результаты исследований были внедрены в АО «ЦНИИСМ» и КНИТУ-КАИ, включая программный алгоритм анализа прочности и оптимизации отсеков с сетчатой нерегулярностью.

- На основе результатов исследований статической прочности композитных конструкций фюзеляжа с нерегулярной сетчатой структурой сформирован научно-технический задел, который будет использован при разработке ряда перспективных авиаконструкций.

Методология и метод исследования: используется методология анализа прочности авиационных конструкций, разработанная и применяемая в ЦАГИ для всех уровней моделирования конструкции планера.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждается тем, что автоматизированный алгоритм анализа прочности сетчатых отсеков и панелей прошли успешную валидацию путем сопоставления результатов расчетов с данными, полученными ранее на основе альтернативных численных исследований и экспериментов.

На защиту выносятся:

- Новая методика и программный алгоритм на его основе для оценки статической прочности сетчатых композитных отсеков фюзеляжа и панелей крыла с регулярной и нерегулярной композитной сетчатой структурой на основе многоуровневых автоматизированных параметрических МКЭ моделей;

- Новый метод гармонизации запасов прочности и устойчивости сетчатых композитных отсеков планера за счет изменения угла наклона спиральных ребер по длине и в поперечном направлении отсека;

- Программный алгоритм, позволяющий значительно ускорить процедуру вычислений прочностных, жесткостных и массовых характеристик отсеков и панелей за счет использования разработанной процедуры распараллеливания расчетных потоков и особенностей структуры многоуровневых прочностных моделей;

- Параметрические зависимости прочностных, жесткостных и массовых характеристик сетчатых отсеков от изменения угла наклона спиральных ребер по длине и в поперечном направлении отсека;

- Результаты численных исследований по оценке прочностных, жесткостных и массовых характеристик нерегулярных сетчатых отсеков в составе планера перспективных сверхзвуковых и дозвуковых пассажирских самолетов.

Личный вклад автора: Изложенные в диссертации результаты получены либо лично автором, либо с его определяющим участием в выборе концепции нерегулярных сетчатых структур, выборе методики решения задач прочности и оптимизации процессов обеспечения прочности.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации полностью соответствует следующим областям исследований, указанным в паспорте специальности 2.5.14:

1. Методы определения внешних силовых нагрузок, действующих на объекты авиационной техники.

2. Обеспечение прочности объектов авиационной техники на основе современных аналитических и численных методов в условиях стационарных внешних воздействий.

6. Оптимизация процессов обеспечения прочности летательных аппаратов.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, из которых 3 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК по специальности 2.5.14, 2 работы – в изданиях, индексируемых Scopus (Q2).

Апробация работы

Основные результаты работы опубликованы доложены на 5 отраслевых, всероссийских и международных конференциях. Зарегистрирована одна программа для ЭВМ, получены 2 акта о внедрении программы и 2 акта о внедрении результатов диссертационной работы.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 87 наименований. Работа содержит 115 страниц печатного текста, 85 рисунков и 8 таблиц.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Во введении дан обзор основных проблем обеспечения прочности, обусловленных низкой деформативностью и прочностью современных связующих для высоконагруженных слоистых композитных конструкций планера пассажирских самолетов. Здесь же представлены результаты анализа основных преимуществ и недостатков существующих композитных конструкций с альтернативными КСС, имеющих сетчатую структуру.

Показана и обоснована актуальность и практическая значимость использования сетчатых нерегулярных структур применительно к конструкции планера перспективных пассажирских самолетов для улучшения их прочностных, жесткостных и массовых характеристик. Во введении указаны причины возросшей трудоемкости процедуры проведения оценки статической прочности и устойчивости нерегулярных сетчатых конструкций.

Во введении обоснованы актуальность и новизна диссертационной работы и показана ее практическая значимость, сформулированы цели и задачи.

В главе 1 по материалам из открытых источников дан обзор исследований прочности и оценке весовой эффективности сетчатых конструкций отсеков с регулярной структурой. Отмечены работы И.Ф. Образцова, В.В. Васильева, А.Ф. Разина, В.А. Бунакова, А.В. Азарова, А.А. Бабичева, А.В. Лопатина, Т.В. Бурнышевой, А.Н. Шаныгина, Е.А. Дубовикова, И.О. Кондакова в развитии методов расчета сетчатых конструкций. В рамках постановки задачи прочности дано описание разработанных конструкций (Рисунок 3, 4), имеющих сеточную КСС и показаны их основные преимущества и недостатки.

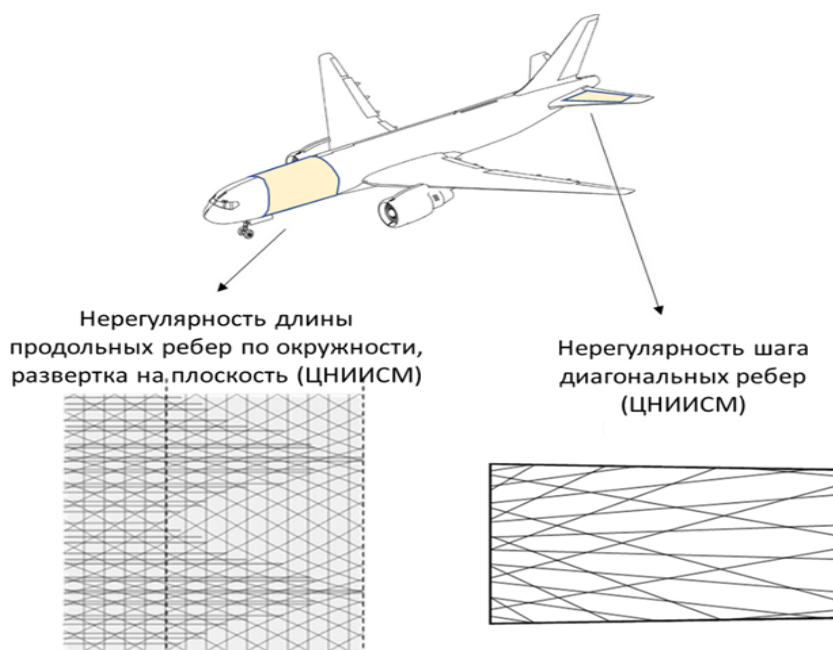


Рисунок 3 – Типы нерегулярности сетчатой структуры за счет изменения длины продольных ребер для отсека фюзеляжа и шага диагональных ребер для панели крыла

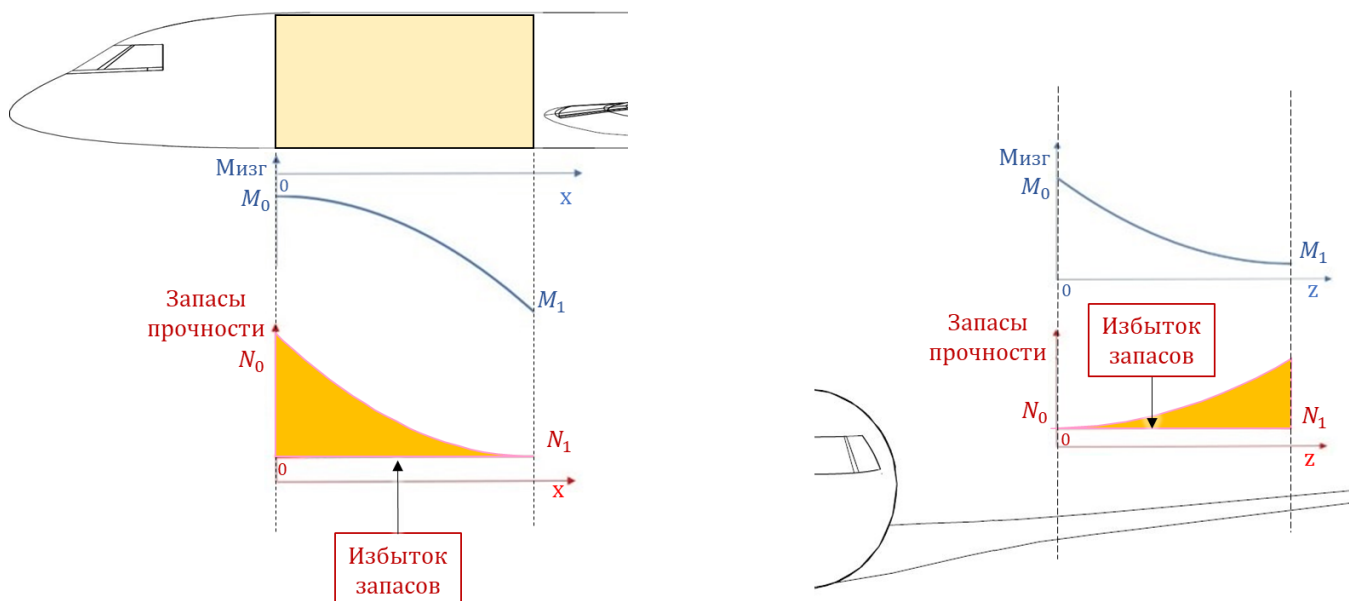


Рисунок 4 – Иллюстрация избыточных запасов по статической прочности по длине отсека фюзеляжа и по размаху крыла для типового среднемагистрального самолета

Обоснована необходимость использования параметрической прочностной модели, описывающей конструкцию на трех уровнях детализации, и сформулированы требования, ограничения и расчетные условия прочности для каждого из данных уровней.

В данной главе также проведена предварительная оценка трудоемкости и длительности расчетных процедур анализа прочности сетчатых регулярных и нерегулярных структур, на основе которой сформированы требования к минимальному увеличению быстродействия, составляющему 20-50 раз за счет использования гармонизации многоуровневой расчетной прочностной модели и многоуровневого распараллеливания вычислительных потоков для кластера ЭВМ.

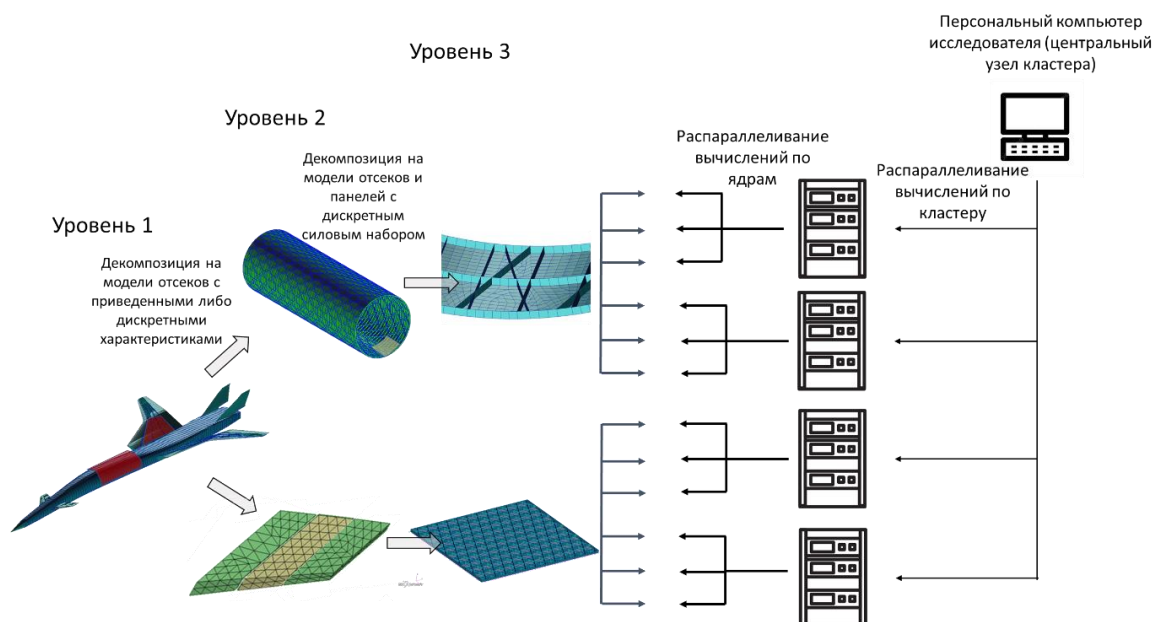


Рисунок 5 – Схема гармонизации вычислительных потоков со структурой прочностной модели планера

В главе 2 дано описание нового метода гармонизации параметров НДС со значениями внешних нагрузок, действующих на отсеки фюзеляжа и крыла, за счет вариации величины и функции $\varphi = \varphi_1(x), \varphi = \varphi_2(\alpha)$ изменения углов наклона ребер в продольном и поперечном направлении (Рисунок 6).

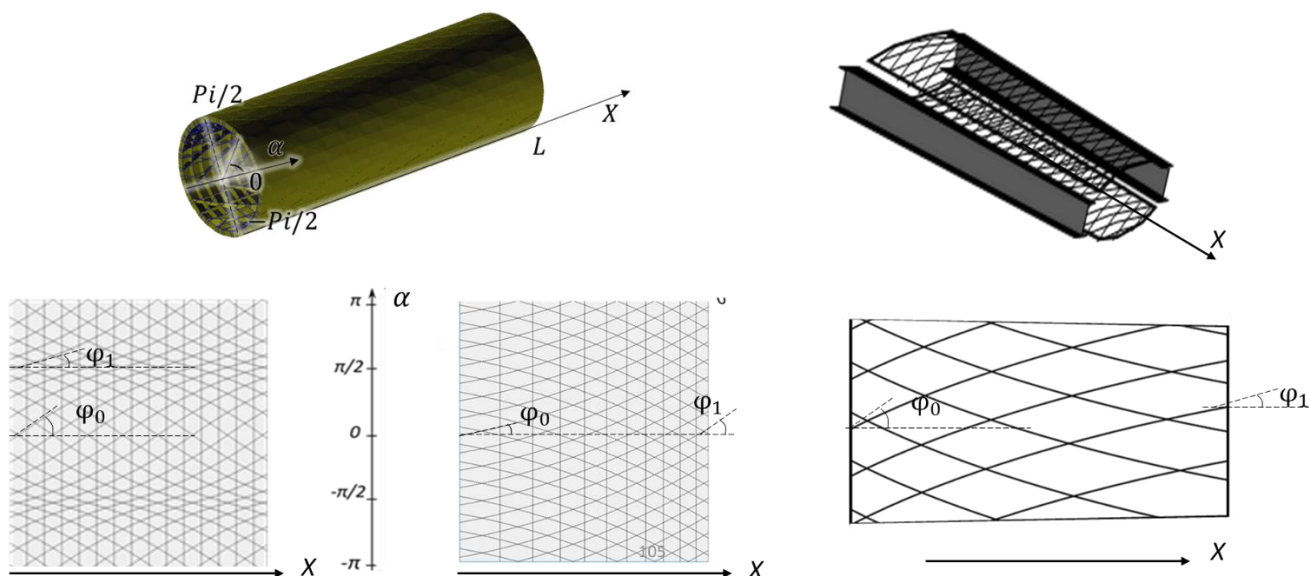


Рисунок 6 – Метод гармонизации прочностных параметров за счет нерегулярных по углу наклона сеток

Метод основан на использовании трехуровневой глобально-параметрической автоматизированной расчетной КЭ модели, которая формируется набором базовых параметров сетчатой структуры и принципами нагружения и взаимодействия моделей разных уровней (Рисунок 7).

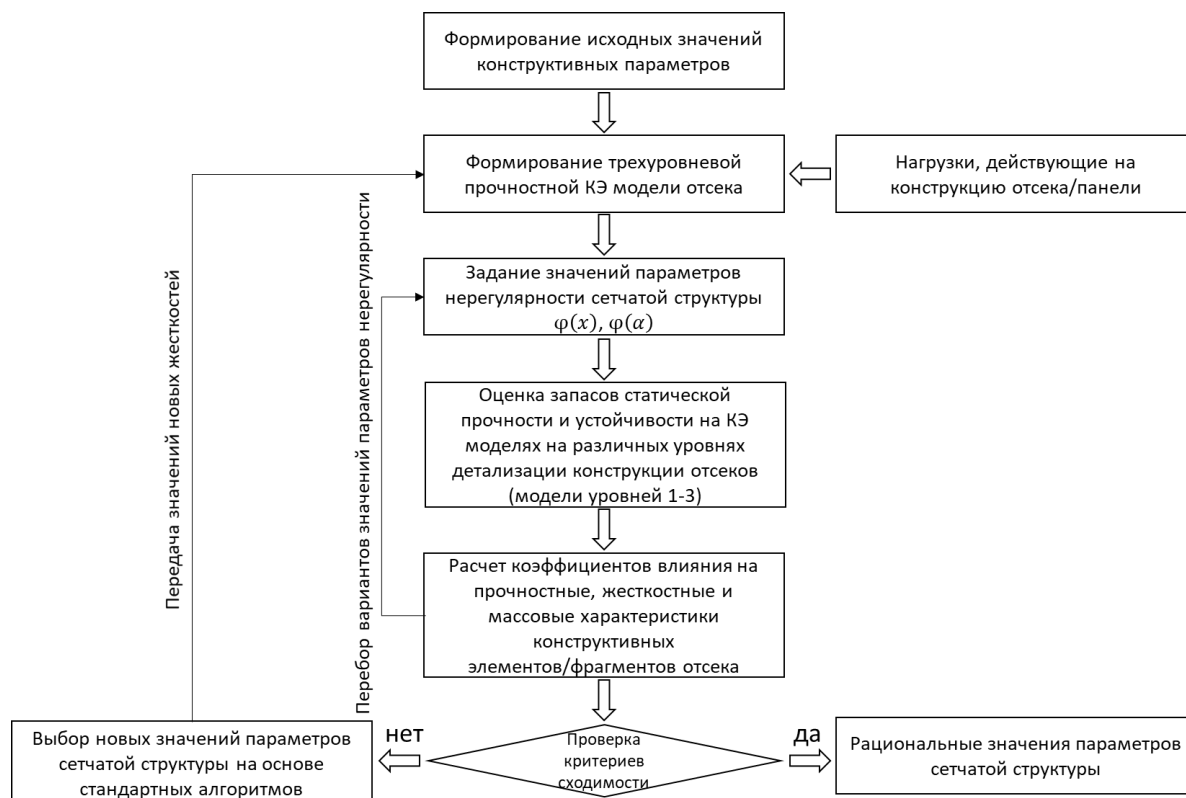


Рисунок 7 – Блок-схема метода гармонизации уровня запасов статической прочности с уровнем внешнего нагружения за счет изменения углов наклона спиральных ребер

Модель первого уровня (глобальная) с распределенными жесткостными параметрами включает всю конструкцию планера с учетом технологического членения на отсеки и используется для определения внешних нагрузок на конструкции отдельных отсеков. Модель второго уровня (отсеки) представляет собой конструктивно-подобную модель отдельного отсека с учетом технологического членения на конструкционные элементы (детали) реберной сетки. Модель третьего уровня в рамках предложенной конфигурации описывает панели и локальные зоны и имеет большую точность по сравнению с моделью второго уровня.

В данной главе также дано описание методики анализа прочности, в рамках которой реализуется метод гармонизации (Рисунок 8). Методика сформирована на основе модифицированного многоуровневого алгоритма анализа прочности, разработанного в ЦАГИ, включающего использование специальных принципов декомпозиции, автоматизированный расчет нагрузок на конструкцию планера и использование разработанной в диссертации процедуры распараллеливания. В качестве МКЭ решателей используются решатели Nastran (Solver 101, 105, 144).

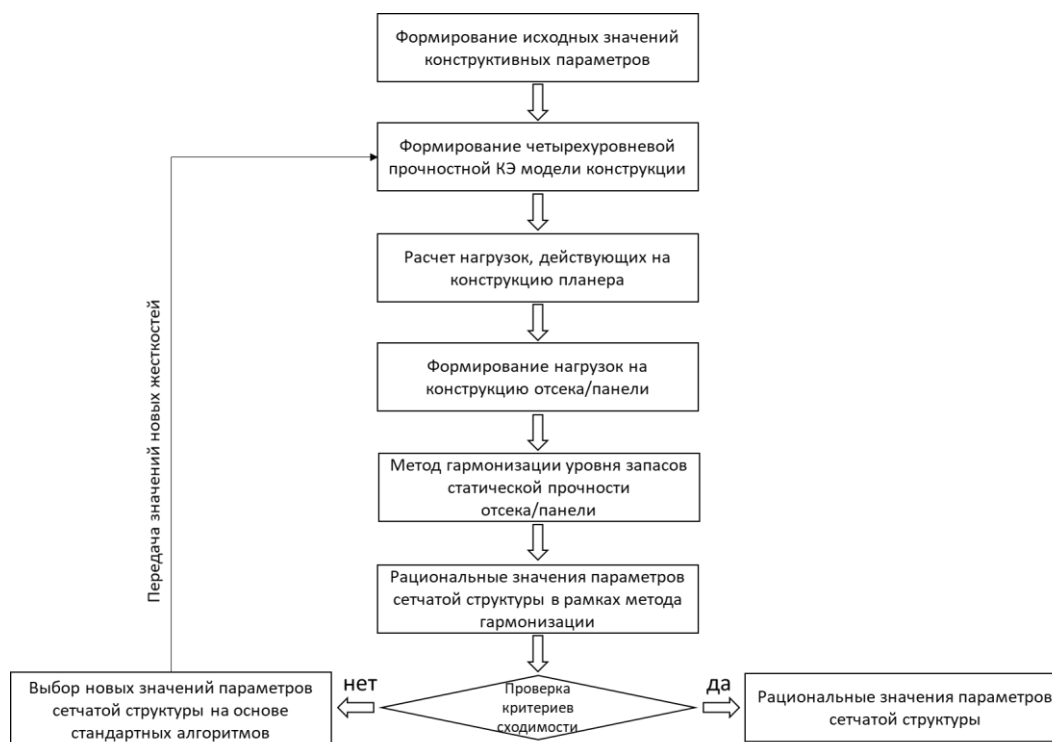


Рисунок 8 – Блок-схема методики анализа прочностных и жесткостных характеристик сетчатых конструкций планера со структурными нерегулярностями

В главе изложена разработанная процедура кластерного распараллеливания вычислений при решении задач анализа прочности для значительного снижения временных затрат за счет особенностей декомпозиции специализированной расчетной МКЭ модели.

При автоматизированном формировании модели первого уровня используется упрощенная аналитическая модель сетчатой структуры, разработанная В.В. Васильевым и уточненная с учетом изгиба ребер в плоскости сетчатой структуры А.В. Азаровым. В общем случае при использовании в сетчатой структуре семейств ребер всех трех типов коэффициенты матрицы податливости по континуальной модели формируются в виде:

$$A_{11} = 2E\overline{\delta_\varphi}c^4 + E\overline{\delta_0}, \quad A_{12} = A_{21} = A_{33} = 2E\overline{\delta_\varphi}c^2s^2$$

$$A_{22} = 2E\overline{\delta_\varphi}s^4 + E\overline{\delta_{90}}$$

$$A_{44} = 2G\overline{\delta_\varphi}c^2 + G\overline{\delta_0}, \quad A_{55} = 2G\overline{\delta_\varphi}s^2 + G\overline{\delta_{90}}$$

$A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}$ - коэффициенты жесткости условного однородного слоя, моделирующего сетчатую структуру; E - модуль упругости материала ребер; G - модуль сдвига материала ребер; $\overline{\delta_\varphi} = \delta_\varphi/a_\varphi$ - относительная толщина сечения диагонального ребра; $\overline{\delta_{90}} = \delta_{90}/a_{90}$ - относительная толщина сечения поперечного ребра; $\overline{\delta_0} = \delta_0/a_0$ - относительная толщина сечения продольного ребра; δ_φ - ширина сечения диагонального ребра; δ_{90} - ширина сечения поперечного ребра; δ_0 - ширина сечения продольного ребра; a_φ - расстояние между диагональными ребрами (по нормали к их осям); a_{90} - расстояние между поперечными ребрами; a_0 - расстояние между продольными ребрами; $c = \cos(\varphi)$ - косинус угла наклона диагональных ребер; $s = \sin(\varphi)$ - синус угла наклона диагональных ребер; φ - угол наклона диагональных (спиральных) ребер по отношению к оси продольной оси.

Приведенные упругие характеристики ортотропного материала вычисляются по формулам:

$$E_1 = A_{11} - \frac{(A_{12})^2}{A_{22}}, \quad E_2 = A_{22} - \frac{(A_{12})^2}{A_{11}},$$

$$\nu_{12} = \frac{A_{12}}{A_{11}}, \quad \nu_{21} = \frac{A_{12}}{A_{22}}, \quad G_{12} = A_{33}$$

В случае с нерегулярными сетками угол наклона и шаг реберной сетки являются функциями координат. Для сетки цилиндрического отсека с нерегулярностью по окружности (тип 1) зависимость углов наклона по угловой координате отсека определяется как кусочно-линейная по угловой координате:

$$\begin{cases} \varphi(\alpha) = \varphi_0 - (\varphi_0 - \varphi_1)(2\alpha/\pi)^n, \alpha \in [0; \pi/2], \\ \varphi(\alpha) = \varphi_1 - (\varphi_1 - \varphi_0)(2\alpha/\pi - 1)^n, \alpha \in [\pi/2; \pi], \end{cases}$$

где φ_0 - угол наклона спиральных ребер на боковых образующих отсека при $\alpha = 0$ и $\alpha = \pi$, φ_1 - угол наклона спиральных ребер на верхней ($\alpha = \pi/2$) и нижней ($\alpha = -\pi/2$) образующих отсека, n - параметр нерегулярности. Сетчатая нерегулярная структура симметрична относительно вертикальной и горизонтальной плоскостей, проходящих через ось симметрии отсека. В данной работе рассмотрены приведенные зависимости при значении коэффициента $n = 1$, т.е. кусочно-линейные зависимости.

Для нерегулярности по углу наклона по продольной координате отсека (тип 2) зависимость угла наклона ребер определяется как линейная по продольной координате:

$$\varphi(x) = \varphi_1 + (\varphi_0 - \varphi_1)(x/L_0)^n, \quad x \in [0, L_0],$$

где φ_0 – угол наклона спиральных ребер в заднем сечении отсека при $x = 0$, φ_1 – угол наклона спиральных ребер в переднем сечении отсека при $x = L_0$, L_0 – длина отсека, n – параметр нерегулярности, $\varphi_0 > \varphi_1$.

Для нерегулярных сетчатых структур в панелях отсека крыла по типу 1 нерегулярность описывается уравнением, аналогичным тип 3 нерегулярности отсека фюзеляжа.

Для передачи нагрузок с модели первого уровня на модели второго уровня использовался способ передачи через обобщенные усилия. В сечениях торцов создаются опорные узлы, связанные с набором узлов, образующих соответствующий торец, посредством жестких элементов связи. На эти узлы задаются значения моментов и перерезывающих сил, соответствующих интегральным значениям нагрузок на торец со стороны примыкающих частей конструкции. Усилия на торцы вычисляются по формулам:

$$M_z = \sum F_{yi} * l_{zi}, M_x = \sum F_{yi} * l_{xi}, Q_y = \sum F_{yi}$$

где F_{yi} – силы на i -м узле в «отсеченной» части конструкции, l_{zi} , l_{xi} – z и x компоненты расстояния от узла до оси жесткости в местной системе координат.

Передача граничных условий с модели второго на модель третьего уровня осуществляется через задание перемещений на узлы кромки модели локальной зоны с использованием интерполяции перемещений:

$$\mathbf{d} = \mathbf{d}_1 + (\mathbf{d}_2 - \mathbf{d}_1) * \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_1}{\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1}$$

где $\mathbf{d}$ – перемещение узла на кромке модели третьего уровня, индексами 1 и 2 обозначены узлы в модели второго уровня, между которыми находится координата узла модели третьего уровня, $\mathbf{d}_1$, $\mathbf{d}_2$ – перемещения опорных узлов, $\mathbf{r}$, $\mathbf{r}_1$, $\mathbf{r}_2$ – координаты соответствующих узлов.

Для решения исследовательских задач с использованием разработанной многоуровневой модели была разработана процедура получения зависимости параметров прочности от изменения параметров нерегулярности и других конструктивных параметров, состоящая из следующих шагов:

1. Формирование значений параметров планера
2. Аэродинамический анализ на модели первого уровня (глобальной модели)
3. Извлечение граничных условий из решения глобальной модели и задание на модели отсеков
4. Проведение анализа чувствительности параметров прочности и массы к изменению параметров нерегулярной сетчатой конструкции.

При выполнении исследований на параметрических моделях с перебором большого значения конструктивных параметров на ресурсозатратных КЭ моделях, быстродействие становится критическим фактором. Это приводит к необходимости разработки мер, снижающих временные затраты до приемлемых. Для снижения вычислительных затрат применены программные методики:

1. Кластеризация расчетов. В соответствии со спецификой многоуровневой модели, распараллеливание возможно вести по всем трем уровням при анализе чувствительности. Для

этого было разработано ПО, позволяющее распараллеливать расчеты как на ядрах одного ЭВМ, так и на кластере. Кластеризация реализована с помощью брокера сообщений RabbitMQ с использованием шаблона RPC (Remote Procedure Call).

2. Использование кэширования результатов. Особенностью расчета на МКЭ моделях является использование одной матрицы жесткости для расчета различных ограничений, определяемых на одной МКЭ модели. Разработана методика кэширования результатов, позволяющая при вычислении чувствительности различных ограничений по одной переменной сохранять результаты МКЭ расчета в специальной структуре данных, и вызывать их без необходимости повторять анализ.

Глава 3 посвящена концептуальным исследованиям и валидации разработанного метода и методики. Проверена точность моделирования на разработанной модели, проведены параметрические исследования влияния нерегулярности структуры сетки на моделях второго и третьего уровня при зафиксированных нагрузках, полученных на модели первого уровня. Показано быстроедействие предложенного метода кластерного распараллеливания вычислительных задач.

Валидация трехуровневой модели проводилась на основе сравнительного анализа результатов с данными из экспериментов. Модель сетчатого отсека первого уровня была проверена на точность моделирования жесткостных параметров, модель дискретной сетчатой структуры была проверена на точность определения НДС. Модель нерегулярной сетчатой структуры в рамках модели первого уровня проверялась на соответствие жесткостных параметров на дискретной МКЭ модели. В качестве объектов валидации были использованы сетчатый отсек-демонстратор и сетчатая панель, изготовленные ЦНИИСМ и испытанные в ЦАГИ.

В результате сравнительного анализа жесткости было показано, что отличие жесткостных характеристик, полученных по упрощенной и подробной расчетным и экспериментальной модели цилиндрической оболочки с регулярной структурой сетки, составило не более 3%. Разница между значениями жесткости, получаемыми по уточненной и упрощенной МКЭ моделям для нерегулярных сеток составляет не более 5%, что соответствует максимальным значениям погрешностей, принимаемых для начальных этапов разработки конструкции.

Сравнительный анализ параметров НДС сетчатой структуры цилиндрической оболочки, получаемых на подробной (дискретной) МКЭ модели и по данным тензометрии при испытаниях цилиндрического отсека и плоской панели. Сравнительный анализ с результатами испытаний отсека показал, что на большей части конструкции, кроме зоны ближайшей к заделке, невязка деформаций не превышает 5 %. Средняя невязка между расчетом и экспериментом на плоской панели составила по продольным деформациям в вертикальных ребрах менее 5 %, в диагональных – до 8 %, в обшивке – до 10 %.

Проведенная валидация показала, что применение упрощенных КЭ моделей в рамках модели «первого уровня» дает хорошие результаты при оценке жесткостных характеристик нерегулярных сетчатых структур в отсеках крыла и фюзеляжа, что позволяет использовать эти

модели для определения нагрузок и передавать их на модели второго и третьего уровня для проведения исследований прочности. Уточненные МКЭ модели цилиндрической оболочки и плоской панели дают достаточное соответствие параметрам НДС, получаемым из эксперимента, что позволяет использовать их для моделирования прочности и устойчивости этих структур.

Анализ влияния нерегулярности на прочностные, жесткостные и весовые характеристики отсеков фюзеляжа был проведен на модели гипотетического отсека фюзеляжа с типовым значением удлинения $L/D = 1.5$, где L – длина отсека, D – диаметр и типичными для среднемагистрального самолета нагрузками. В результате исследований было показано положительное влияние, состоящее в:

- увеличении жесткости в вертикальной плоскости и увеличения запасов прочности в ребрах для нерегулярности «тип 1»

- снятии избыточного запаса прочности по длине отсека для нерегулярности «тип 2».

На графиках (Рисунок 9) показаны запасы прочности ребер в эквивалентных по массе отсеках с регулярной и нерегулярной структурой сетки:

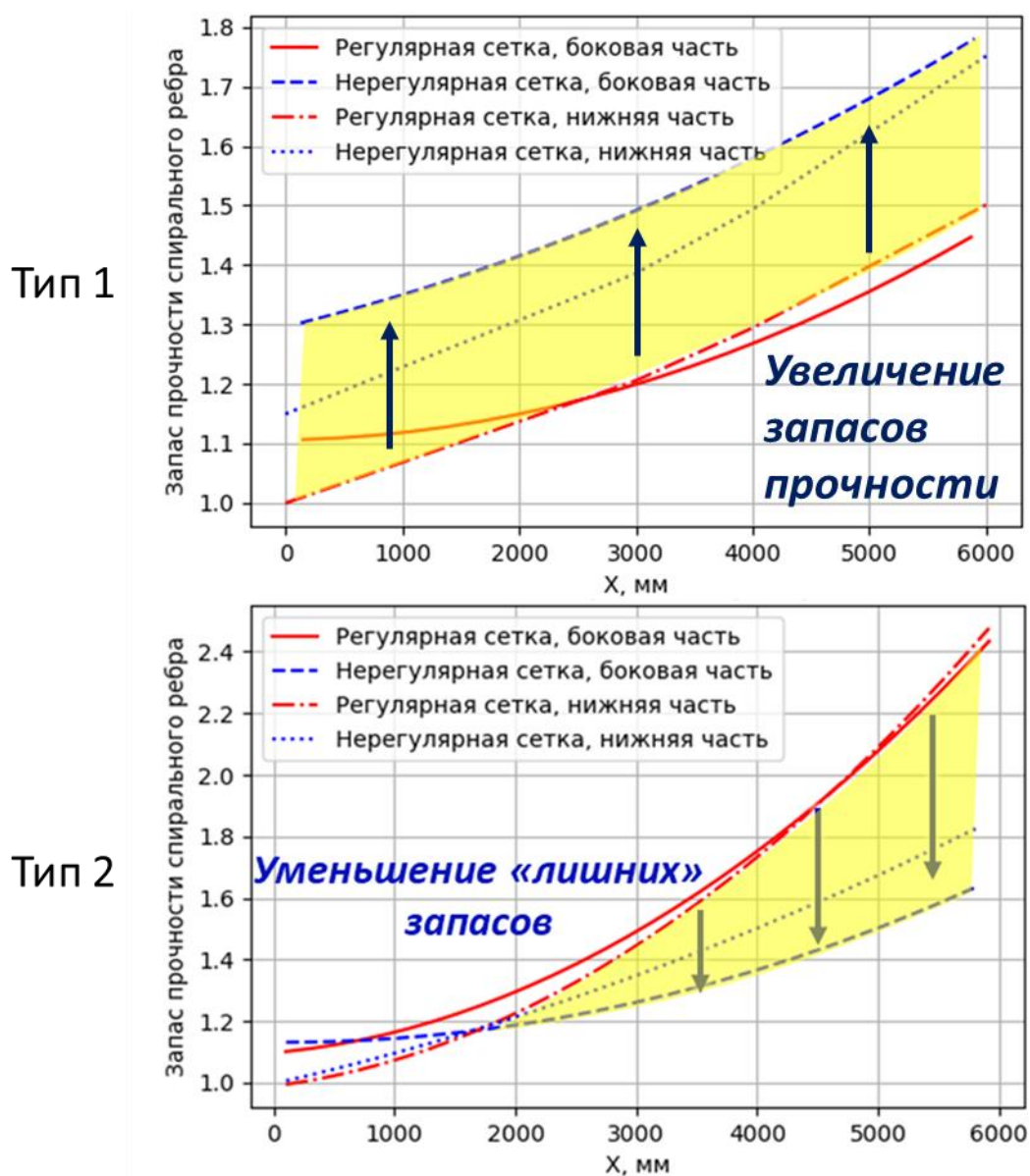


Рисунок 9 – Зависимости прочностных и массовых параметров от степени нерегулярности в отсеках фюзеляжа.

Продemonстрирована возможность улучшения жесткостных и весовых свойств отсеков благодаря использованию схем нерегулярности структуры реберной сетки.

Исследование об эффективности применения сетчатых КСС нерегулярной структуры в отсеках крыла было проведено на модели отсека гипотетического регионального самолета с типовыми нагрузками, характеризующимися возрастающим изгибающим и крутящим моментом от конца крыла к центроплану. Для панелей с нерегулярной КСС была показана гармонизация запасов прочности ребер по длине (Рисунок 10). Снижение разницы между запасами прочности в корневой и концевой части панели говорит о рациональности предложенных схем нерегулярности и возможности снижения веса панели.

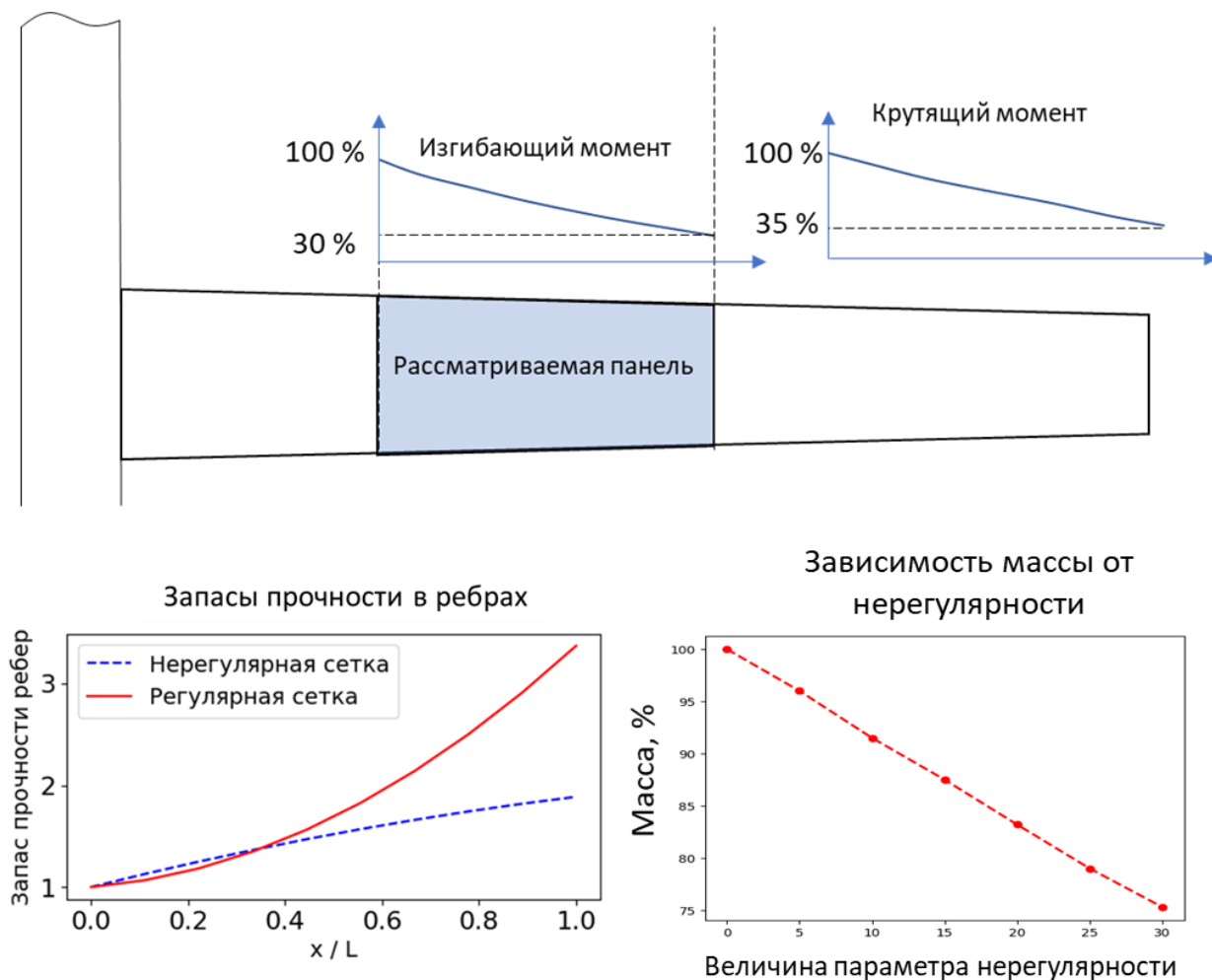


Рисунок 10 – Зависимости прочностных и массовых параметров от степени нерегулярности в отсеке крыла.

В главе 4 диссертации представлены результаты исследований прочности нерегулярных сетчатых структур применительно к разрабатываемым в настоящее время конструкциям пассажирских самолетов, включая:

- отсеки фюзеляжа среднемагистрального самолета;
- удлиненные носовые отсеки для разрабатываемого в рамках НМЦУ «Сверхзвук» перспективного пассажирского сверхзвукового самолета с низким уровнем звукового удара;
- панели крыла регионального самолета.

Результаты были получены на основе разработанного метода в рамках новой методики анализа прочности с использованием моделей на всех трех уровнях и с пересчетом массовых характеристик отсеков и внешних нагрузок на планер.

Для носовых сетчатых отсеков фюзеляжа среднемагистрального пассажирского самолета (СМС) приведены результаты исследования прочности и потенциала к снижению веса при использовании предложенных схем нерегулярности. Рассматривались носовые отсеки фюзеляжа, имеющие удлинение 1.5. На основании исследований показан потенциал к снижению веса за счет использования разных типов структурной нерегулярности:

Таблица 1 – Расчетная масса носовых сетчатых отсеков СМС для различных типов нерегулярности

Составляющая	Традиционная алюминиевая КСС	Композитная обшивочная	Реберная регулярная КСС	Нерегулярная по окружности	Нерегулярная по длине
Вес силовой части	(100%)	96 %	53.4 %	49.5%	50.4 %
Вес обшивки			28.8 %	28.8 %	28.8 %
Вес защиты	0 %	0 %	8 %	7.4%	7.1 %
Итог	100 %	96 %	90	85.7 %	86.3 %

Для конструкции удлиненного фюзеляжа СПС в рамках проекта НМЦУ «Сверхзвук» на основе проведенных исследований было показано, что использование нерегулярной структуры может обеспечить повышение изгибной жесткости в вертикальной плоскости отсека до 8 % по сравнению с регулярной структурой. Учитывая, что регулярная сетчатая структура обеспечивает лучшие весовые характеристики по сравнению с металлическими, и композитными обшивочными КСС при одинаковых значениях изгибной жесткости в вертикальной плоскости, имеет массу, меньшую на 12 %, полученные результаты имеют практическое значение. Следует отметить, что с повышением изгибной жесткости в вертикальной плоскости происходит уменьшение жесткости в горизонтальной плоскости, что может быть основным ограничением для применения данной схемы нерегулярности. Однако для конструкций СПС снижение жесткости в горизонтальной плоскости не является критическим, поскольку оно частично компенсируется жесткостью наплывов.

Ни рисунке (Рисунок 11) показаны результаты исследований. В данном случае повышение изгибной жесткости отсека достигнуто за счет изменения угла наклона спиральных ребер по окружности. Был получен Парето-фронт рациональных вариантов конструктивных параметров, обеспечивающих необходимые прочностные характеристики, минимальные по массе и максимальные по жесткости при различных величинах параметра нерегулярности (Рисунок 11).

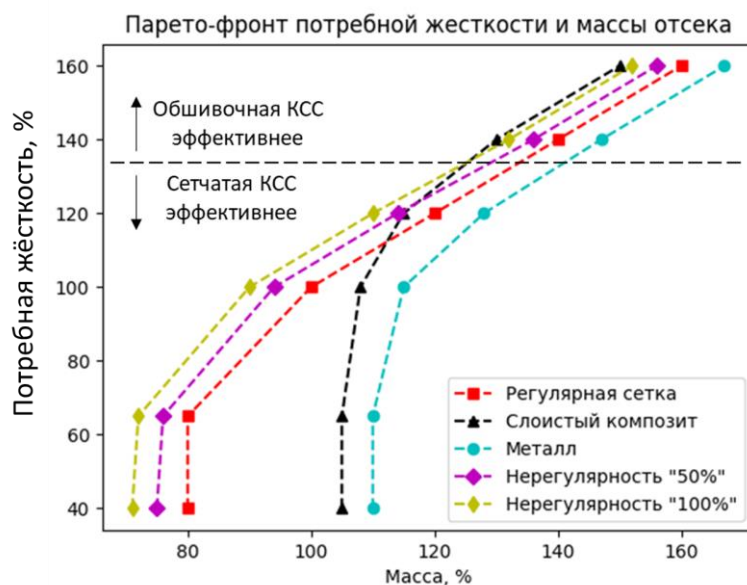


Рисунок 11 – Парето-фронт потребной жесткости и массы отсека.

В данной главе также получены результаты прочностных и жесткостных характеристик сетчатых панелей с нерегулярностью по уменьшению углов наклона в рамках крыла лонжеронной схемы регионального пассажирского самолета. Особенностью данной панели в рамках отсека крыла является то, что она не является ответственной высоконагруженной частью, а служит вспомогательным элементом, защищая композитные (металлокомпозитные) лонжероны от ударных воздействий и обеспечивая необходимый аэродинамический контур. В рамках данной концепции панель воспринимает аэродинамические нагрузки и вносят реальный вклад в крутильную и незначительный вклад в изгибную жесткость.

Проведённые в рамках такой постановки исследования показали, что сетчатая структура с углами наклона 45 градусов в корневой части панели и 27 градусов в концевой позволяет при сохранении прочности получить панели меньшей массы. Сравнительный анализ регулярного и нерегулярного сетчатого варианта и металлического варианта показал следующее соотношение между массами:

- Традиционная металлическая КСС – 100 %;
- Реберная регулярная КСС – 89 %;
- Реберная нерегулярная КСС – 85 %.

В данной главе был также проведен анализ временных затрат при исследовании прочности реальных конструкций с нерегулярной структурой сетки, который показал, что использование метода кластерного распараллеливания при расчетах на многоуровневых моделях дало ускорение процедуры расчетов в 10 раз и более. При использовании разработанного алгоритма распараллеливания удастся получить рост вычислительной эффективности, близкий к линейному. В среднем время вычислений при подключении узлов в кластер в добавок к центральному узлу уменьшается по формуле $t = t_0 * \frac{n}{n+n_{add}}$, где n – количество работающих потоков на центральном узле, n_{add} – добавленное количество потоков на подчиненных узлах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации получен ряд результатов, имеющих важное научное и практическое значение:

1. Разработаны, валидированы и прошли практическую апробацию метод, программный алгоритм и многоуровневая автоматизированная прочностная МКЭ модель для анализа прочности и проведения параметрических исследований нерегулярных сетчатых структур для отсеков крыла и фюзеляжа.
2. Предложены и успешно обоснованы 2 типа КСС со структурной нерегулярностью для отсеков фюзеляжа и 1 тип для отсеков крыла, позволяющих значительно улучшить прочностные, жесткостные и массовые характеристики сетчатых отсеков и панелей до 5 % и более по сравнению с альтернативными регулярными сетчатыми КСС и до 15 % и более по сравнению с металлическими и композитными обшивочными КСС.
3. Проведена успешная адаптация разработанной МКЭ модели в рамках четырехуровневого алгоритма, разработанного ранее в ЦАГИ, для анализа прочности конструкций с нерегулярными сетчатыми КСС, что позволило значительно расширить диапазон альтернативных вариантов КСС в рамках автоматизированного поиска рациональной конструкции пассажирского самолета на начальных этапах разработки.
4. Разработана и реализована процедура рационального распараллеливания вычислительных потоков для ЭВМ с многоядерными процессорами, позволяющая обеспечить положительную синергию со специальной декомпозицией МКЭ моделей в рамках четырехуровневого алгоритма, что позволило увеличить производительность вычислений в 10 и более раз.
5. Для удлиненного отсека носовой части фюзеляжа СПС на основе выбора рациональных нерегулярных сетчатых структур найдено конструктивное решение, обеспечивающее значительное повышение жесткости при обеспечении прочности и сохранении веса.
6. Для гипотетических конструкций пассажирских самолетов, близких по своим характеристикам к среднемагистральным (СМС) и региональным самолетам (РС), разрабатываемым в настоящее время в отечественной индустрии получены рациональные решения использования нерегулярных сетчатых структур с лучившими прочностными, жесткостными и весовыми характеристиками, в частности:
 - для отсеков фюзеляжа СМС показана возможность снижения веса до 14% по сравнению с металлическими конструкциями, нерегулярный сетчатый каркас становится на 7.5 % легче регулярного.
 - для отсеков крыла РС в вариантах низкоплан и высокоплан показана возможности снижения веса до 4 % по сравнению с вариантом с регулярной сеткой и до 15 % по сравнению с металлическими вариантами при сохранении жесткостных и прочностных характеристик, включая характеристики ударостойкости.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. «Strength analysis of alternative airframe layouts of regional aircraft on the basis of automated parametrical models» Vedernikov D.V., Shanygin A.N., Mirgorodsky Y.S., Levchenkov M.D. Aerospace. 2021. T. 8. № 3.
2. «Нерегулярная сетчатая КСС оболочки отсека фюзеляжа с переменным в поперечном сечении углом наклона спиральных ребер» Левченков М.Д., Дубовиков Е.А., Марескин И.В., Миргородский Ю.С., Беликов С.Э. В книге: Скоростной транспорт будущего: перспективы, проблемы, решения. тезисы 1-ой Международной научно-технической конференции. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Москва, 2022. С. 60-61.
3. «Исследование прочности реберного отсека фюзеляжа с нерегулярной структурой сетки» Левченков М.Д., Дубовиков Е.А., Кондаков И.О., Фомин Д.Ю., Шаныгин А.Н. Ученые записки ЦАГИ. 2022. Т. 53. № 6. С. 131-141.
4. «Исследование прочностных, жесткостных и весовых параметров нерегулярного сетчатого силового каркаса отсека фюзеляжа СПС» Дубовиков Е.А., Кондаков И.О., Левченков М.Д., Шаныгин А.Н. В книге: Фундаментальные проблемы создания СПС нового поколения. Сборник тезисов международной конференции. Москва, 2022. С. 120-122.
5. «Новый подход к оптимизации бионических конструкций планера СПС» Дубовиков Е.А., Левченков М.Д. В книге: Фундаментальные проблемы создания СПС нового поколения. Сборник тезисов выездной секции Международной школы-семинара. Москва, 2021. С. 36-37.
6. «Весовая эффективность сетчатой конструкции с нерегулярной структурой для отсека фюзеляжа пассажирского самолета» Левченков М.Д., Дубовиков Е.А., Миргородский Ю.С., Фомин Д.Ю., Шаныгин А.Н. Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 4. С. 98-108.
7. «Исследование весовой эффективности конструкций отсеков фюзеляжа перспективного СПС с нерегулярной сетчатой структурой» Ведерников Д.В., Дубовиков Е.А., Зиченков М.Ч., Левченков М.Д., Шаныгин А.Н. В книге: XIII Всероссийский Съезд по теоретической и прикладной механике. Сборник тезисов докладов. В 4-х томах. Санкт-Петербург, 2023. С. 228-230.
8. «Исследование весовой эффективности сетчатой конструкции с нерегулярной структурой для отсека фюзеляжа пассажирского самолета» Дубовиков Е.А., Левченков М.Д., Ведерников Д.В., Марескин И.В., Миргородский Ю.С. В книге: Международный конгресс по аэронавтике. Сборник тезисов. Москва, 2023. С. 385-387.
9. «Investigation of non-regular grids for lattice fuselage barrels» Evgeny Dubovikov, Ivan Kondakov, Mikhail Levchenkov, Danil Fomin and Alexander Shanygin, Special Issue: 11th EASN Virtual Conference. 2025
10. «Оптимизация панелей самолета на МКЭ моделях в рамках глобально-локального подхода с применением кластеризации вычислительной системы» Левченков М.Д., Ученые записки ЦАГИ, в редакции, ожидаемая дата публикации – ноябрь 2025.
11. «Программа оптимизации сетчатого композитного каркаса цилиндрической оболочки» Шаныгин А.Н., Дубовиков Е.А., Левченков М.Д., Ведерников Д.В., Марескин И.В., Миргородский Ю.С. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023663906, 28.06.2023. Заявка № 2023662212 от 13.06.2023.