

Павельчук Максим Владимирович

**ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
КОНСТРУКЦИИ ФЮЗЕЛЯЖА В ЗОНЕ БОЛЬШОГО ВЫРЕЗА
С УЧЁТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ**

2.5.13. Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет) на кафедре конструкции и проектирования летательных аппаратов.

Научный
руководитель:

Болдырев Андрей Вячеславович,
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой
конструкции и проектирования летательных аппаратов
Самарского университета.

Официальные
оппоненты:

Бельский Александр Борисович,
Заслуженный конструктор Российской Федерации, доктор
технических наук, профессор, заместитель исполнительного
директора по науке и инновационному развитию, заместитель
генерального конструктора по вертолётным комплексам
специального назначения, комплексам авиационного
вооружения и обороны вертолётов акционерного общества
«Национальный центр вертолётостроения имени М. Л. Миля и
Н. И. Камова»;

Бурнышева Татьяна Витальевна,
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой
прочности летательных аппаратов федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Новосибирский государственный
технический университет».

Ведущая
организация:

Федеральное автономное учреждение «**Сибирский научно-
исследовательский институт авиации имени
С. А. Чаплыгина**», г. Новосибирск.

Защита состоится 15 декабря 2023 года в 10.00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.03, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте Самарского университета: https://ssau.ru/files/resources/dis_protection/Pavelchuk_M_V_Topologicheskoe_proektirovanie_konstrukcii.pdf.

Автореферат разослан « » _____ 2023 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.379.03
кандидат технических наук, доцент

А. В. Крамлих

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из основных вопросов в проектировании летательных аппаратов (ЛА) является снижение массы конструкции. На весовую эффективность фюзеляжей существенное влияние оказывает выбор силовой схемы конструкции (ССК) в зонах больших вырезов (пассажирские, аварийные, грузовые, багажные люки). Вырезы уменьшают жёсткость конструкции в радиальном и продольном направлении, вызывают концентрацию напряжений в обшивке. Для компенсации вырезов требуется «вложить» в дополнительные элементы конструкции массу материала, существенно превышающую массу вырезанной части конструкции.

Топологическая оптимизация фюзеляжей обычно выполняется с применением модели, заполняющей непрерывной упругой средой переменной плотности и жёсткости всё допустимое для размещения силовых элементов пространство. Интерпретация результатов оптимизации распределения материала в континуальной модели является нетривиальной задачей. Большие вырезы в конструкции фюзеляжа нарушают регулярность каркаса, приводят к появлению депланации сечений, существенных изгибающих и крутящих моментов вдоль контуров вырезов и больших градиентов усилий в элементах конструкции. Кроме того, континуальные модели фюзеляжа, нагруженного внутренним избыточным давлением, зачастую приводят к парадоксальным теоретическим решениям, связанным с целесообразностью размещения обшивки вдоль внутренней поверхности континуальной модели и отсутствием обшивки по теоретическим обводам фюзеляжа.

Таким образом, проектирование окантовок фюзеляжа в зоне больших вырезов представляет актуальную проблему.

Степень разработанности темы. Методы топологической оптимизации конструкций на основе модели гипотетического *изотропного* материала с переменными по объёму плотностью, модулем упругости и допускаемыми напряжениями рассматриваются в работах Комарова А.А., Комарова В.А., Болдырева А.В. Интерпретация результатов оптимизации выполняется с использованием потоков главных усилий и главных касательных сил.

Процессы топологической оптимизации конструкций на основе *анизотропного* материала, создаваемого при введении периодически распределённых пор в некотором усреднении (метод гомогенизации) рассматриваются в базовой статье Bendsoe M.P., Kikuchi N. и в работах многих последователей, включая обзорные работы Deaton J.D., Eschenauer H.A., Grandhi R.V., Hsu M.-H., Liu J., Liu S., Ma Y., Martí P., Olhoff N., Papadimitrou V.S., Querin O.M., Rozvany G.I.N., Saitou K., Victoria M., Xia L., Yuksel O., Zhang W.H., Zhu J.H. и др.

Разработаны методы оптимизации авиационных конструкций, учитывающие различные *функциональные требования*: прочности и жёсткости (Fleury C., Бельский А.Б., Гайнутдинов В.Г., Данилин А.И., Кретов А.С., Липин Е.К., Рудых Г.Н., Шаныгин А.Н.), прочности и устойчивости (Дмитриев В.Г., Рабинский Л.Н., Серьёзов А.Н.), аэроупругости (Образцов И.Ф., Чедрик В.В.), живучести (Сафронов В.С.), усталостной прочности, долговечности и ресурса (Белов В.К., Нестеренко Г.И., Серьёзов А.Н., Стрижиус В.Е., Щербань К.С.).

Методы проектирования отсеков фюзеляжа с большими вырезами рассматриваются в работах Schuhmacher G., Бурнышевой Т.В., Каледина В.О., Просунцова П.В. Известны

работы по обеспечению достоверности расчётов на основе экспериментальных методов исследования: поляризационно-оптических (Frocht М.М., Александров А.Я., Мавлютов Р.Р., Савин Г.Н.), тензометрии (Касаткин Б.С., Пригоровский Н.И., Хлебутин Н.В.), акустоупругости (Никитина Н.Е.). Работы Wu К.С., Голованова А.И., Городецкого А.С., Железнова Л.П., Фомина В.П., Чумаченко Е.Н. посвящены учёту нелинейностей в конструкциях фюзеляжей.

Большинство современных герметичных фюзеляжей ЛА содержат *традиционное техническое решение* в зоне больших вырезов – вдоль поперечных краёв выреза используются силовые шпангоуты, а вдоль продольных краёв выреза – балки или бимсы. Основным недостатком является низкая жёсткость упругой системы в радиальном и продольном направлении. Анализ известных технических решений для фюзеляжей на основе научно-технической литературы и патентного поиска свидетельствует о наличии возможностей (резервов) для усовершенствования обрамления вырезов в целях снижения концентрации напряжений, повышения жёсткости и уменьшения массы конструкции.

Целью диссертационной работы является разработка и апробирование методики топологической оптимизации фюзеляжа в зоне большого выреза для повышения его весовой эффективности.

Задачи исследования.

1. Разработать методику топологической оптимизации конструкции фюзеляжа в зоне большого выреза с учётом ограничений по прочности и жёсткости. Проанализировать возможность применения методики на учёт основных расчётных случаев нагружения герметичных фюзеляжей.

2. Оценить достоверность математической модели фюзеляжа в зоне большого выреза. Сформулировать рекомендации для адекватного моделирования конструкций в этих зонах на ранних стадиях проектирования.

3. Выполнить отработку на электронном макете отсека фюзеляжа с большим вырезом нового конструктивного решения, полученного с применением разработанной методики топологической оптимизации.

Научная новизна работы.

1. Разработана методика топологической оптимизации конструкции фюзеляжа, отличающаяся использованием комбинированной оптимизационной модели, содержащей каркасированную оболочку с присоединённым к ней в зоне выреза непрерывным упругим наполнителем переменной плотности. Новизной и особенностями методики проектирования являются способ учёта функциональных ограничений по прочности и жёсткости на основе обобщённых перемещений обшивки фюзеляжа, использование массы конечных элементов в комбинированной модели в качестве переменных проектирования, потоков главных усилий и главных касательных сил при анализе силовой работы наполнителя переменной плотности.

2. Выявлена весовая эффективность размещения на внутренней поверхности элементов каркаса фюзеляжа двумерных тонкостенных элементов, предназначенных для компенсации большого выреза.

3. Найдено новое конструктивное решение фюзеляжа с большим вырезом, отличающееся наличием в угловых зонах выреза силовых панелей, смещённых внутрь фюзеляжа от теоретических обводов конструкции. Внутренние панели соединяются с

наружной обшивкой с помощью шпангоутов, продольных и наклонных стенок. Наличие в силовой схеме внутренней панели приводит к повышению жёсткости конструкции в радиальном направлении в зоне выреза и уменьшению усилий, действующих в обшивке и подкрепляющих элементах. Это обстоятельство позволяет уменьшить массу элементов конструкции отсека фюзеляжа, обрамляющих вырез.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– Разработана методика проектирования рациональной силовой схемы фюзеляжа в зоне большого выреза с использованием комбинированной оптимизационной модели, в которой последовательно чередуются процессы структурной и параметрической оптимизации упругой системы;

– Сформулированы рекомендации для адекватного конечно-элементного моделирования конструкции фюзеляжа в зоне большого выреза на ранних стадиях проектирования;

– Разработано новое конструктивное решение отсека фюзеляжа в зоне большого выреза, для которого получен патент РФ на изобретение RU 2646175 C1. Выполнена оценка перспектив его практического применения в авиационных конструкциях;

– Результаты работы внедрены на авиастроительных предприятиях (получены акты внедрения): «ОКБ Сухого» – филиал ПАО «Компания «Сухой» (г. Москва), НАЗ «СОКОЛ» – филиал АО «РСК «МиГ» (г. Нижний Новгород);

– Результаты используются в учебном процессе ВУЗов: МАИ (г. Москва), НГТУ им. Р.Е. Алексеева (г. Нижний Новгород), Самарский университет (г. Самара) при обучении студентов специальности 24.05.07 «Самолёто- и вертолётостроение».

Методы исследования. Метод конечных элементов. Методы нелинейного математического программирования. Методы натурного эксперимента – фотоупругости, тензометрии.

Положения, выносимые на защиту:

– Методика топологической оптимизации конструкции фюзеляжа в зоне большого выреза с использованием комбинированной оптимизационной модели;

– Результаты обеспечения достоверности математической модели фюзеляжа в зоне большого выреза;

– Результаты отработки нового конструктивного решения по силовой схеме фюзеляжа в зоне выреза под люк и оценка перспектив его применения для авиационных конструкций.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов при исследовании фюзеляжа в зоне выреза под люк обеспечена теоретически известными и практически проверенными методами анализа напряжённо-деформированного состояния конструкций, включая методы численного анализа применяемой программы NASTRAN для инженерного анализа. Адекватность моделирования подтверждена сравнением с точными аналитическими решениями и данными натуральных испытаний конструкций.

Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях:

Международных: I-я конференция «Скоростной транспорт будущего: перспективы, проблемы, решения», ОУЦ «Алушта» МАИ, г. Москва, 2022 г.; VIII конференция

«Актуальные проблемы авиации и космонавтики», СибГУ, г. Красноярск, 2022 г.; XIV конференция «Гражданская авиация: XXI век», УИГА, Ульяновск, 2022 г.; 20-я, 18-я, 17-я конференции «Авиация и космонавтика», МАИ, г. Москва, (2021, 2019, 2018 гг.); XIII, X конференции «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», МГТУ ГА, г. Москва, (2021, 2013 гг.); 6th Russian-German Conference on Electric Propulsion and Their Application (RGCEP-2016), Samara University, Samara, 2016 г.; XXII конференция Туполевские чтения (школа молодых учёных), КНИТУ-КАИ, г. Казань, 2015 г.; XIII, XII конференции «Королёвские чтения», СГАУ, Самара, (2015, 2013 гг.); II конференция «Актуальные вопросы технических наук в современных условиях», ИЦРОН, Санкт-Петербург, 2015 г.; II конференция «Проблемы теории и практики современной науки», Таганрог, 2014 г.; XVIII конференция «Перспективы развития информационных технологий», ЦРНС, Новосибирск, 2014 г.;

Всероссийских: II Конгресс молодых учёных (г. Сочи, «Сириус», 2022): финал VII Национального конкурса инновационных проектов аэрокосмической отрасли SKY.TECH, организатор ЦАГИ, г. Жуковский, 2022 г.; IV конференция «Моделирование авиационных систем», ГосНИИАС, г. Москва, 2020 г.; I конференция молодых авиаторов России «Авиация будущего: тренды, вызовы и возможности», КНИТУ-КАИ, г. Казань, 2019 г.; VII конференция «Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии», ОГУ, г. Оренбург, 2015 г.

Публикации. Результаты исследования опубликованы в 31 печатной работе, в том числе в 6 статьях в журналах из перечня, рекомендованного ВАК России, в статье из списка Scopus, получен патент РФ на изобретение и свидетельство на регистрацию базы данных.

Структура и объём работы. Структура диссертации содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы из 166 наименований и 3 приложения. Работа содержит 123 страницы машинописного текста, 70 рисунков, 8 таблиц.

Область исследования соответствует пунктам 1 и 3 направлений исследования паспорта научной специальности 2.5.13.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлено обоснование актуальности темы диссертации, цель работы и постановка задач исследования. Формулируется научная новизна, определяется теоретическая ценность и практическая значимость работы, методы исследований, положения, выносимые на защиту и достоверность полученных результатов исследования.

Первая глава является обзорной, в которой рассматривается современное состояние теоретических аспектов проектирования ССК фюзеляжей.

В разделе 1.1 приводится анализ силовых схем фюзеляжей с большими вырезами.

Разделы 1.2 и 1.3 содержат обзоры методов топологического проектирования авиационных конструкций и публикаций авторов, исследования которых направлены на изучение вопросов адекватности математических моделей фюзеляжей в зонах больших вырезов.

В разделе 1.4 приводится **выбор математической модели** объекта исследования.

Допустимая область проектируемой конструкции фюзеляжа, где могут размещаться силовые элементы, представляет собой геометрическое пространство, которое определяется внешними границами, совпадающими с теоретическим контуром обводов

фюзеляжа, и внутренними границами необходимого свободного пространства, определяемого компоновочными соображениями вне зон размещения пассажирских, грузовых и приборных отсеков.

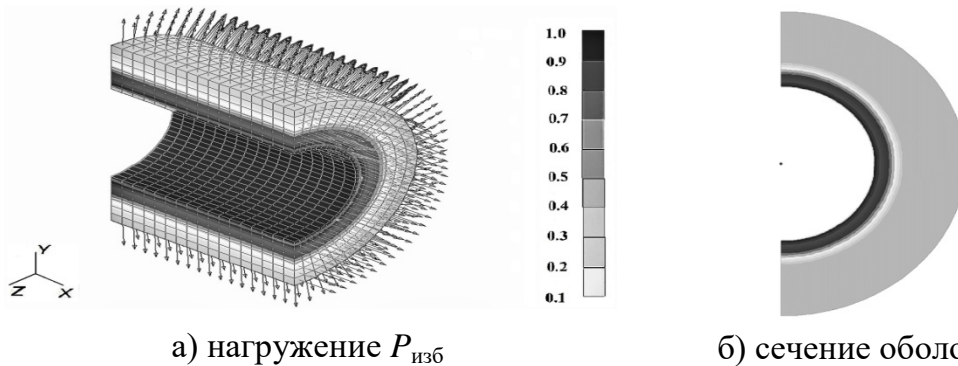
Допустимая область заполняется гипотетической непрерывной упругой средой переменной плотности и жёсткости, называемой далее "заполнителем", в которой прочностные и упругие характеристики линейно связаны с плотностью ρ изотропного материала на основе следующих соотношений:

$$\bar{E} = \rho \cdot \bar{E}, \quad (1)$$

$$\bar{\sigma} = \rho \cdot \bar{\sigma}, \quad (2)$$

где $\bar{E}, \bar{\sigma}$ – модуль упругости и допускаемое напряжение материала; $\bar{E}, \bar{\sigma}$ – удельные характеристики при единичной плотности. В процессе топологической оптимизации отыскивается оптимальное распределение плотности ρ .

Для отсека герметичного фюзеляжа допустимая область представляет собой толстостенную цилиндрическую оболочку, нагруженную внутренним избыточным давлением $P_{изб}$. Толщина оболочки определяется строительной высотой шпангоутов в отсеке фюзеляжа. На рис. 1 представлены результаты численного эксперимента (показана половина оболочки).



а) нагружение $P_{изб}$

б) сечение оболочки

Рисунок 1 – Распределение плотности ρ в теоретически оптимальной конструкции

После топологической оптимизации по алгоритму поиска полнонапряжённой конструкции сгустки плотности ρ материала выявлены по внутренней границе допустимой области, что объясняется минимальной длиной внутреннего контура сечения оболочки. Эти результаты оптимизации можно интерпретировать как целесообразность использования обшивки фюзеляжа вдоль внутреннего контура допустимой области. Такое решение, полученное средствами топологической оптимизации, не учитывает требование придания фюзеляжу формы удобообтекаемого тела, и не может рассматриваться как рациональное решение. Из этих соображений обшивка должна располагаться по внешнему контуру допустимой области.

Для преодоления указанного недостатка в настоящей диссертации для топологической оптимизации фюзеляжа предлагается использовать **комбинированную оптимизационную модель**, представленную на рис. 2. Оптимизация распределения материала в заполнителе и анализ его силовой работы позволяет выявить элементы конструкции, необходимые для рационального подкрепления выреза в оболочке отсека фюзеляжа.

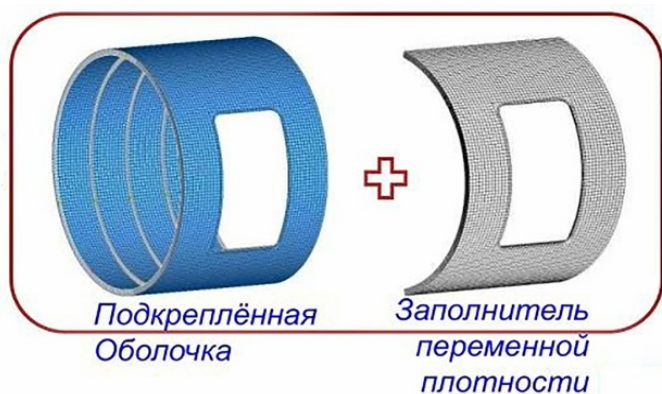


Рисунок 2 – Оптимизационная модель

Оптимизационная модель объединяет подкреплённую каркасированную оболочку и тело переменной плотности в зоне выреза. Оболочка располагается по внешнему контуру допустимой области и обеспечивает удобообтекаемость фюзеляжа.

Во **второй** главе рассматриваются вопросы обеспечения достоверности математических моделей фюзеляжа в зоне выреза на ранних стадиях проектирования.

В разделе 2.1 разрабатывается методика анализа достоверности математических моделей, основанная на анализе специально подобранных объектов, показанных на рис. 3. Для объекта А эталоном является значение коэффициента концентрации напряжений K_σ , полученное по данным натурального эксперимента на основе метода фотоупругости. Объект Б в качестве эталона имеет точное аналитическое решение. Для оценки точности моделирования объекта В используются данные натурального эксперимента.

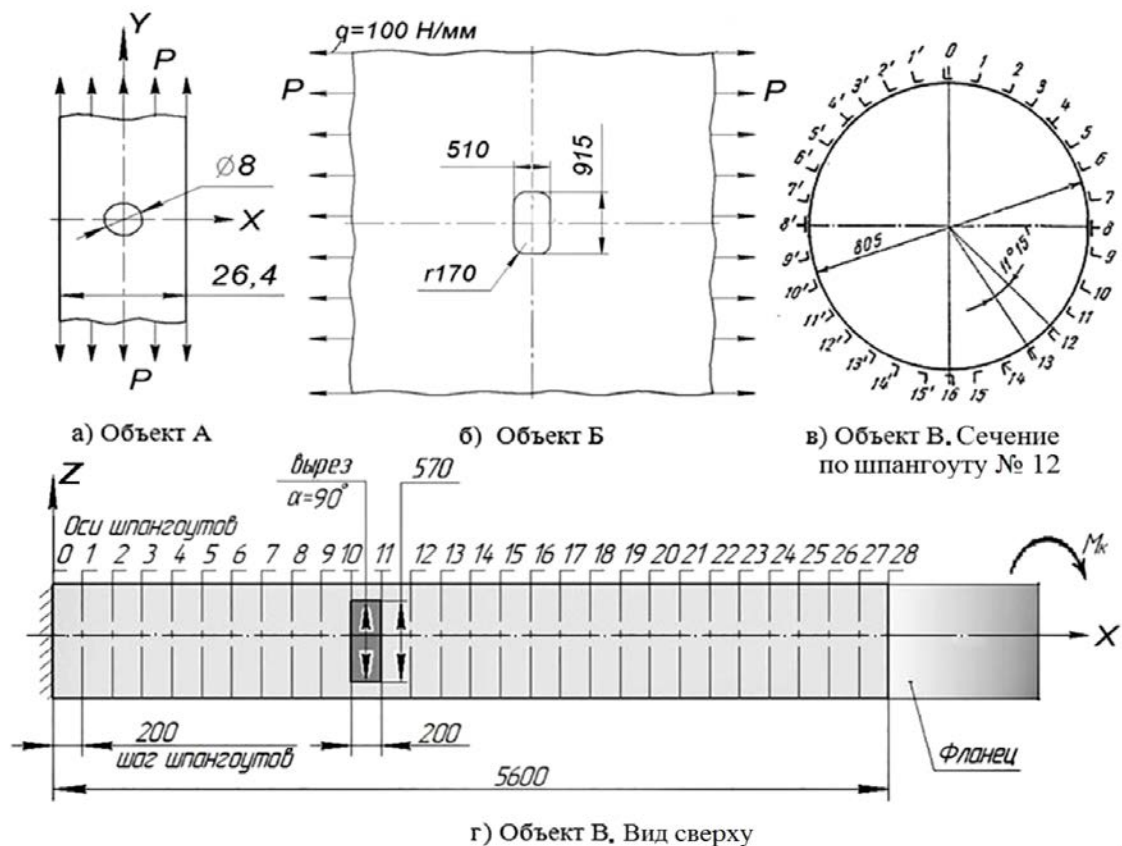


Рисунок 3 – Геометрические характеристики исследуемых объектов

В разделе 2.2 исследуется влияние подробности сетки модели на точность определения коэффициента концентрации напряжений для объектов А и Б.

В разделе 2.3 оценивается адекватность моделирования поля напряжений и деформаций в окрестности выреза на объектах А и В.

В разделе 2.4 сравниваются аналитические и численные решения в линейном и нелинейном статическом анализе конструкций с концентраторами напряжений.

В разделе 2.5 анализируются результаты исследования достоверности моделей, представленные в таблице 1. Приняты следующие обозначения: тип проверки СА – сравнение проверяемой характеристики с точным аналитическим решением, СН – сравнение проверяемой характеристики с данными натурального эксперимента, ϵ – максимальная погрешность математической модели при соблюдении сформулированных рекомендаций.

Таблица 1 – Матрица верификации модели конструкции с вырезом

| Объект | Проверяемые характеристики | Тип проверки | Погрешность, ϵ |
|--|---|--------------|-------------------------|
| А) Пластина с круглым отверстием | $K\sigma$ | СН | 2,0 % |
| | Нормальное напряжение в элементах полосы | СН | 3,7 % |
| | Максимальное касательное напряжение в элементах полосы | СН | 5,0 % |
| Б) Пластина с прямоугольным отверстием | $K\sigma$ (Линейный анализ) | СА | 6,7 % |
| | $K\sigma$ (Нелинейный анализ) | СА | 5,7 % |
| В) Каркасированная цилиндрическая оболочка с большим прямоугольным вырезом | Эквивалентное напряжение в обшивке в наиболее нагруженном элементе | СН | 0,7 % |
| | Максимальное касательное напряжение в обшивке в наиболее нагруженном элементе | СН | 7,5 % |
| | Нормальное напряжение в стрингере-бимсе на пересечении с силовым шпангоутом | СН | 6,1 % |
| | Смещение сечений шпангоутов | СН | 6,3 % |

Определены нижние границы для параметров сетки модели, позволяющие обеспечить достоверное моделирование исследуемых объектов при минимальных вычислительных затратах. Учёт этих ограничений важен при разработке математических моделей конструкций для целей оптимального проектирования. Сформулированы рекомендации по адекватному моделированию конструкции фюзеляжа в зоне выреза.

1. Проверено и подтверждено, что для моделирования обшивки фюзеляжа в зоне большого выреза рационально использовать вдоль контура выреза хотя бы один ряд элементов правильной формы. Под правильной формой элемента понимаются фигуры в виде квадрата, прямоугольника и близкие к ним очертания.

2. Выявлено, что вдоль контура отверстия целесообразно задавать не менее 150 конечных элементов, поскольку при этом достигается приемлемая точность при высокой вычислительной эффективности.

3. Для повышения степени достоверности математических моделей фюзеляжа в зоне большого выреза установлено, что целесообразно задавать разбиение сеткой элементов обшивки и стрингеров вдоль одной шпации шпангоутов не менее чем на 12 конечных элементов.

4. Установлено, что в расчётах на прочность конструкции целесообразно учитывать эффекты физической и геометрической нелинейности.

Третья глава содержит методику топологического проектирования фюзеляжей.

В разделе 3.1 разрабатывается методика топологического проектирования фюзеляжа в зоне большого выреза с применением *комбинированной оптимизационной модели*. Процессы топологической оптимизации основаны на поэтапном замещении гипотетического материала со свойствами (1)–(2) элементами конструкции, реализующими принимаемые технические решения.

Сущность процессов проектирования заключается в следующем.

1. Рассматривается «традиционная» ССК с известными по прототипам техническими решениями.

2. Разрабатывается конечно-элементная модель первого типа (КЭМ-1), содержащая силовые элементы объекта проектирования с исходной силовой схемой (*электронный макет конструкции*).

3. Проводится *параметрическая оптимизация* распределения материала в элементах конструкции. Оценивается весовая эффективность силовой схемы и проверяется выполнение функциональных требований, предъявляемых к конструкции.

4. Разрабатывается комбинированная модель второго типа (КЭМ-2), объединяющая КЭМ-1 и присоединённый в исследуемой зоне по всем контактным поверхностям заполнитель переменной плотности. Заполнитель, моделируемый трёхмерными конечными элементами, потенциально содержит внутри себя все возможные варианты усовершенствования ССК за счёт изменения формы и расположения имеющихся силовых элементов или добавления дополнительных элементов, образуемых в модели сгустками плотности материала заполнителя.

5. Оптимизация распределения материала в заполнителе (*структурная оптимизация*) позволяет выявить теоретически оптимальную конструкцию (ТОК) и на основе анализа ТОК разработать усовершенствованную ССК, наиболее приближённую с точки зрения её силовой работы к теоретическому решению. Далее управление передаётся в пункт 1 и усовершенствованная ССК принимается в качестве исходной.

6. Процесс проектирования продолжается, пока очередные изменения ССК приводят к снижению массы конструкции и не исчерпано заданное число циклов проектирования. При нарушении этих условий проводится нелинейный поверочный расчёт и осуществляется выход из вычислительного процесса.

В разделе 3.2 рассматривается оптимизация распределения материала в комбинированной модели конструкции в терминах нелинейного математического программирования.

В КЭМ-2 применяются разные типы конечных элементов, для которых характерна различная физическая размерность переменной составляющей объёма элемента, используемой для целей оптимизации. В качестве проектных переменных в диссертации приняты массы конечных элементов m_i , связанные линейно либо с переменными составляющими объёма для одномерных и двумерных элементов, либо с плотностью материала для трёхмерного заполнителя:

$$m_i = \rho_i V_i, \quad V_i = \xi_i \eta_i, \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (3)$$

где V – объём i -го конечного элемента; ξ – постоянная составляющая объёма i -го элемента (для пластинчатых элементов – площадь в плане, для стержневых элементов – длина, для объёмных конечных элементов – объём); η – переменная составляющая объёма i -го элемента (для пластинчатых элементов – толщина, для стержневых элементов – площадь поперечного сечения); n – число элементов КЭМ.

Целевой функцией является масса конструкции M в виде:

$$M = \sum_{i=1}^n m_i. \quad (4)$$

Ограничения первого рода записываются так:

$$m_i^{\min} \leq m_i \leq m_i^{\max}, \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (5)$$

где m_i^{\min} и m_i^{\max} – ограничения снизу и сверху для i -й переменной проектирования.

Ограничения второго рода имеют вид:

$$g_j(m) = C_j(m) - \bar{C}_j \leq 0, \quad (j = 1, 2, \dots, p_1), \quad (6)$$

$$g_j(m) = \sigma_j(m) - \bar{\sigma}_j \leq 0, \quad (j = p_1 + 1, p_1 + 2, \dots, p), \quad (7)$$

где g_j – j -ое функциональное ограничение; C_j и \bar{C}_j – обобщённые перемещения узлов КЭМ и их допускаемые значения; p_1 – количество ограничений на обобщённые перемещения; p – общее количество функциональных ограничений; $\sigma_j(m)$ – эквивалентное напряжение в элементах КЭМ-2 по принятой теории прочности; $\bar{\sigma}_j$ – допускаемое напряжение материала.

Обобщённое перемещение C_j записывается в виде:

$$C_j = \{Q_j\}^T \{u\}, \quad (8)$$

где $\{Q_j\}$ – вектор коэффициентов линейной комбинации перемещений узлов КЭМ-2;

$\{u\}$ – вектор перемещений узлов КЭМ-2.

В качестве обобщённого перемещения C_j принимается линейная деформация в обшивке фюзеляжа на краю выреза, позволяющая контролировать концентрацию напряжений. Также обобщённые перемещения позволяют контролировать деформации оболочки по сечениям шпангоутов и депланацию сечений. При этом учёт ограничений по условиям прочности (7) предлагается осуществлять на основе концепции полнонапряжённости. Такой подход позволяет значительно повысить эффективность алгоритма оптимизации распределения материала в комбинированной модели за счёт сведения ограничений на напряжения (7) к ограничениям снизу на значения переменных проектирования (5) в форме:

$$m_i^{\min} = m_i^{(\nu)} \max_k \left(\frac{\sigma_{ik}}{\bar{\sigma}} \right), \quad (k = 1, 2, \dots, s), \quad (9)$$

где σ_{ik} – эквивалентные напряжения, вычисленные по выбранной теории прочности для i -го элемента и k -го случая нагружения; s – количество случаев нагружения; ν – номер итерации.

Представленные выше соотношения позволяют разработать алгоритм, показанный на рис. 4.

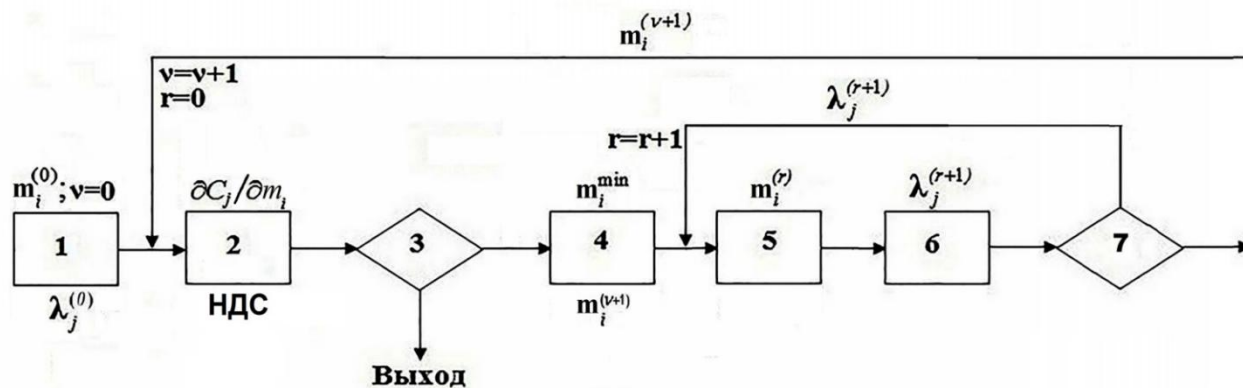


Рисунок 4 – Структура алгоритма оптимизации комбинированной модели

В блоке 1 задаётся исходное распределение материала $m_i^{(0)}$ для элементов силового каркаса и заполнителя в КЭМ-2. Алгоритм содержит "внутренний" и "внешний" циклы. В блоке 2 выполняется анализ напряжённо-деформированного состояния конструкции, рассчитываются коэффициенты чувствительности $\partial C_j / \partial m_i$ по формуле:

$$\frac{\partial C_j}{\partial m_i} = - \frac{\{u^{(q)}\}^T [A_i]^T [K_i] [A_i] \{u\}}{m_i}, \quad (10)$$

где $\{u^{(q)}\}$ – возможные перемещения КЭМ-2 при приложении виртуальной нагрузки $\{Q_j\}$, определяемые путём решения системы линейных алгебраических уравнений $[K]\{u^{(q)}\} = \{Q_j\}$; $[K]$ – матрица жёсткости конструкции с заполнителем; $[K_i]$ – матрица жёсткости i -го элемента комбинированной модели; $[A_i]$ – булева матрица перехода от матрицы жёсткости i -го элемента к глобальной матрице.

В числителе соотношения (10) записана работа внутренних усилий i -го элемента $[K_i][A_i]\{u\}$ на возможных перемещениях узлов этого элемента $\{u^{(q)}\}^T [A_i]^T$.

В блоке 4 по формуле (9) определяются минимальные значения переменных проектирования m_i^{min} , необходимые по прочности.

В результате шагов внутреннего цикла определяются новые значения проектных переменных $m_i^{(r)}$ в блоке 5, строятся линейные аппроксимации функциональных ограничений $C_j^{(r)}$ и определяются множители Лагранжа $\lambda_j^{(r+1)}$ в блоке 6 на основе подхода Fleury C. Критерием выхода из внутреннего цикла в блоке 7 является выполнение условий (6). Если шаг в области поиска становится мал или исчерпано заданное число итераций, то процесс вычислений во внешнем цикле прекращается в блоке 3.

В разделе 3.3 рассматриваются вопросы анализа силовой работы теоретически оптимальной конструкции фюзеляжа и интерпретации результатов топологической оптимизации. Предлагается программа интерпретации результатов структурной оптимизации с применением визуализации потоков главных усилий и главных касательных сил применительно к исследованию заполнителя комбинированной модели фюзеляжа.

В разделе 3.4 приводятся результаты тестирования алгоритма оптимизации на примере модельной задачи с концентрацией напряжений, в которой алгоритм подтверждает свою работоспособность.

В разделе 3.5 предлагается методика обучения топологическому проектированию фюзеляжей на основе комбинированной оптимизационной модели. В качестве средства обучения на основе CALS-технологий используется учебное виртуальное предприятие (идея Черепашкова А.А.), разработанное на базе Самарского университета, в котором имитируется работа в едином информационном предприятии авиационной отрасли и реализуется методика топологического проектирования фюзеляжа.

В четвёртой главе проводится отработка нового конструктивного решения фюзеляжа в зоне выреза под люк.

В разделе 4.1 приводится постановка типовой задачи проектирования фюзеляжа. Рассматривается два расчётных случая нагружения – избыточное внутреннее давление $P_{изб}$ и крутящий момент $M_{кр}$, приложенный по торцам отсека фюзеляжа. Места приложения нагрузок от внутреннего давления, действующего на дверь люка, показаны на рис. 5 точками. Требуется найти рациональную по массе ССК для отсека фюзеляжа в зоне выреза, расположенного между шпангоутами № 9 и № 13, при условии $K\sigma = 3,0$.

В диссертации исследуются силовые схемы фюзеляжа, представленные на рис. 6.

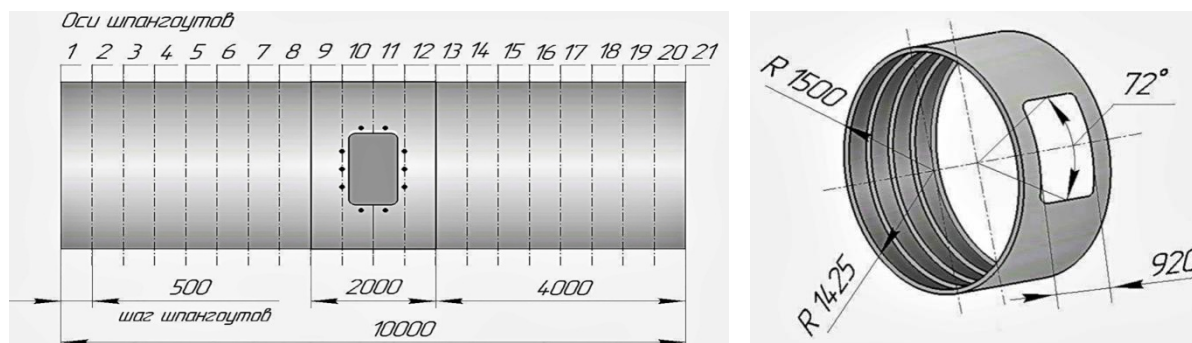


Рисунок 5 – Геометрические ограничения исследуемого отсека фюзеляжа

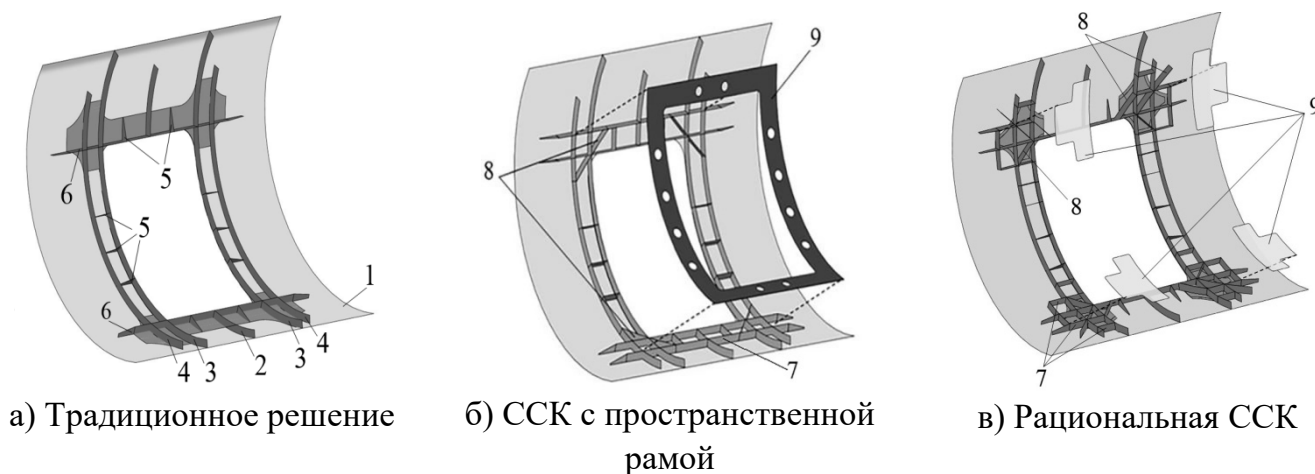


Рисунок 6 – Исследуемые варианты конструкции: 1 – обшивка с накладками; 2 – рядовой шпангоут; 3 – усиленный шпангоут; 4 – сабли шпангоутов; 5 – диафрагмы; 6 – продольная балка; 7 – продольная стенка; 8 – наклонная стенка; 9 – внутренняя панель.

В разделе 4.2 анализируется традиционное техническое решение (рис. 6, а), которое содержит расположенные вдоль продольных границ выреза продольные балки, у поперечных краёв выреза – усиленные шпангоуты. За 16 итераций параметрической

оптимизации найден проект, для которого масса усиливающих вырез элементов в отсеке фюзеляжа составляет 48,53 кг.

В разделе 4.3 разрабатывается КЭМ-2, содержащая наружную обшивку, шпангоуты и континуальный наполнитель. Наполнитель присоединяется к обшивке в области выреза и для удобства интерпретации результатов разделяется по толщине на 8 слоёв объёмных конечных элементов. Найдена ТОК с массой наполнителя, необходимой для компенсации выреза 33,59 кг.

В наполнителе ТОК наибольшие значения плотности достигаются во внешнем и во внутреннем слое наполнителя. Значения плотности в срединных слоях, расположенных между ними, существенно меньше. Анализ картин распределения усилий показывает, что при нагружении фюзеляжа кручением наиболее эффективно работает материал наполнителя вдоль всей продольной кромки выреза. В случае нагружения фюзеляжа внутренним избыточным давлением наполнитель эффективно работает в угловых областях выреза. Анализ силовой работы КЭМ-2 позволяет сформировать усовершенствованную силовую схему.

В разделе 4.4 исследуется техническое решение, показанное на рис. 6, б. Конструкция содержит внутреннюю панель 9, две дополнительные продольные балки и четыре наклонные стенки 8, расположенные в углах выреза. Панель смещена внутрь фюзеляжа от внешней поверхности цилиндрической оболочки и дублирует обшивку на участке выреза. В панели 8 предусмотрены технологические отверстия для обеспечения доступа внутрь образующихся замкнутых контуров. Соединение внутренней панели с обшивкой осуществляется за счёт продольных и наклонных стенок, силовых и рядовых шпангоутов. Совокупность силовых элементов образуют вдоль контура выреза пространственную тонкостенную раму.

Анализ распределения плотности материала и усилий в наполнителе КЭМ-2 свидетельствуют о целесообразности изменения формы внутренней панели и добавления наклонных стенок в углах выреза.

В разделе 4.5 анализируется усовершенствованная конструкция (рис. 6, в), которая содержит четыре внутренних панели 9, расположенные в углах выреза и смещённые внутрь конструкции от теоретического контура фюзеляжа. Крепление внутренних панелей к обшивке осуществляется с помощью продольных, поперечных и наклонных стенок, усиленных и рядовых шпангоутов. В углах выреза элементами конструкции формируются замкнутые и полые контуры. За 16 итераций параметрической оптимизации найден проект, для которого масса усиливающих вырез элементов в отсеке фюзеляжа составляет 39,93 кг.

Проведённые патентные исследования показали, что данную силовую схему можно трактовать как **новое конструктивное решение** – получен патент РФ на изобретение RU 2646175 С1.

В разделе 4.6 приводится оценка перспектив применения нового конструктивного решения по следующим критериям.

1) *Масса материала для компенсации выреза* (сводка представлена в таблице 2).

2) *Оценка ресурса окантовок выреза в моделях* выполняется на основе комплексной процедуры оценки допустимых напряжений и усталостной долговечности элементов авиаконструкций, согласно методике Стрижиуса В.Е. Выявлено, что новое конструктивное решение фюзеляжа в зоне выреза, полученное в процессе топологической оптимизации, позволяет снизить массу конструкции с сохранением ресурса традиционной конструкции.

3) Оценка деформации оболочки по сечениям шпангоутов и депланации сечений.

Анализируется жёсткость оболочки по сечению силового шпангоута № 10, расположенного вблизи контура выреза (рис. 5). Результаты вычислительного эксперимента демонстрируют существенное (на 14%) повышение жёсткости фюзеляжа с рациональной ССК в зоне большого выреза в радиальном направлении при кручении оболочки.

Таблица 2 – Весовая сводка элементов усиления выреза в отсеке фюзеляжа

| Наименование | Традиционное техническое решение | | Силовая схема с пространственной рамой | | Новое конструктивное решение | |
|-------------------|----------------------------------|---------------|--|---------------|------------------------------|---------------|
| | m, кг | \bar{m} , % | m, кг | \bar{m} , % | m, кг | \bar{m} , % |
| Накладки обшивки | 19,19 | 39,5 | 14,36 | 31,9 | 9,75 | 24,4 |
| Шпангоуты | 20,65 | 42,6 | 18,05 | 40,1 | 17,42 | 43,6 |
| Диафрагмы | 0,39 | 0,8 | 0,55 | 1,2 | 0,78 | 1,9 |
| Сабли шпангоутов | 2,22 | 4,6 | 1,89 | 4,2 | 1,95 | 4,9 |
| Продольные балки | 6,08 | 12,5 | 5,28 | 11,7 | 5,50 | 13,8 |
| Внутренняя панель | – | – | 3,21 | 7,2 | 1,71 | 4,3 |
| Наклонные стенки | – | – | 0,67 | 1,5 | 1,40 | 3,5 |
| Продольные стенки | – | – | 0,98 | 2,2 | 1,42 | 3,6 |
| Итого | 48,53 | 100,0 | 44,99 | 100,0 | 39,93 | 100,0 |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика топологического проектирования конструкции фюзеляжа в зоне большого выреза с использованием комбинированной оптимизационной модели, включающей в себя деформированное твёрдое тело переменной плотности. Методика объединяет процессы структурной и параметрической оптимизации, основана на поэтапном замещении в комбинированной модели элементов гипотетического материала переменной плотности силовыми элементами, реализующими принятые технические решения. Сформулированы рекомендации по анализу силовой работы конструкции фюзеляжа в комбинированной оптимизационной модели с использованием потоков главных усилий и главных касательных сил.
2. Разработан алгоритм оптимизации распределения материала в комбинированной оптимизационной модели, основанный на использовании концепции полнонапряжённости и учёте ограничений на обобщённые перемещения, контролируемые напряжения в обшивке на контуре выреза, деформации оболочки по сечениям шпангоутов и депланацию сечений.
3. Проанализирована достоверность математических моделей фюзеляжа в зоне большого выреза. Сформулированы рекомендации для адекватного моделирования конструкции фюзеляжа на ранних стадиях проектирования.
4. С использованием разработанной методики топологического проектирования на примере типового дверного выреза найдено новое конструктивное решение фюзеляжа, позволяющее снизить теоретически необходимую массу усиливающих вырез элементов на 17,7% при сохранении ресурса. Преимущество предложенной конструкции заключается в том, что разнесённые между собой на величину строительной высоты

шпангоутов наружная обшивка и внутренние панели образуют вместе с соединяющими их элементами упругую систему, способную эффективно воспринимать изгибающие и крутящие моменты, возникающие на контуре выреза. Совокупность силовых элементов формирует в углах большого выреза замкнутые и полые контуры, повышающие жёсткость конструкции в зоне выреза в радиальном направлении.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Болдырев, А. В. Анализ адекватности результатов конечно-элементного моделирования фюзеляжа в зоне большого выреза / А. В. Болдырев, **М. В. Павельчук** // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2023. – Т. 26. – № 4. – С. 64–76.

2. Болдырев, А. В. Развитие методики топологической оптимизации конструкции фюзеляжа в зоне большого выреза / А. В. Болдырев, **М. В. Павельчук**, Р. Н. Синельникова // Вестник Московского авиационного института. – 2019. – Т. 26. – № 3. – С. 62–71.

3. Болдырев, А. В. Методика обучения топологическому проектированию конструкций на основе моделей тела переменной плотности / А. В. Болдырев, **М. В. Павельчук** // Онтология проектирования. – 2016. – Т. 6. – № 4(22). – С. 501–513.

4. Болдырев, А. В. Формализация проектирования силовых схем авиационных конструкций на основе процессного подхода / А. В. Болдырев, **М. В. Павельчук** // Автоматизация. Современные технологии. – 2015. – № 5. – С. 37–39.

5. Болдырев, А. В. Развитие методики проектирования силовых схем авиационных конструкций с использованием модели тела переменной плотности / А. В. Болдырев, **М. В. Павельчук** // Известия Самарского научного центра РАН. – 2013. – Т. 15. – № 6(3). – С. 603–606.

6. Павельчук, М. В. Экономическая оценка стоимости внедрения автоматизированных CAD/PDM-систем на предприятиях ракетно-космического комплекса / **М. В. Павельчук** // Автоматизация. Современные технологии. – 2013. – № 7. – С. 36–38.

Объекты интеллектуальной собственности:

7. Пат. RU 2646175 С1, Российская Федерация, МПК В64С 1/14. Отсек фюзеляжа летательного аппарата с вырезом под люк / А. В. Болдырев, В.А. Комаров, **М. В. Павельчук**; заявитель и патентообладатель Самарск. нац. исследоват. ун-т им. акад. С.П. Королёва; – № 2016150351; заявл. 20.12.2016; опубл. 01.03.2018, Бюл. № 7. – 11 с.

8. Болдырев, А. В. Учебные задания на проектирование силовых схем авиационных конструкций: свидетельство о государственной регистрации базы данных / А. В. Болдырев, В. А. Комаров, **М. В. Павельчук**. Российская Федерация. – М.: РОСПАТЕНТ. – № 2016620151; зарег. 02.02.2016; опубл. 20.02.2016. – 1 с.

Статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых базами Scopus или WoS:

9. Boldyrev, A. V. Evaluation of anisogrid composite lattice structures weight effectiveness using the load-carrying factor / A. V. Boldyrev, D. M. Kozlov, **M. V. Pavelchuk** // Procedia Engineering. – 2017. – V. 185. – P. 153–159.