

На правах рукописи



**ФРЕЙЛЕХМАН СТАНИСЛАВ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ  
СИЛОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ  
АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность

05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Москва – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: Рипецкий Андрей Владимирович  
к.т.н., доцент кафедры 904 «Инженерная графика»  
Московского авиационного института  
(национального исследовательского университета)

Официальные оппоненты: Пухов Андрей Александрович  
д.т.н., федеральное государственное бюджетное  
учреждение «Национальный исследовательский  
центр «Институт имени Н.Е Жуковского»,  
директор проектного комплекса «Гражданские  
самолеты»

Данилкин Евгений Васильевич,  
к.т.н., акционерное общество «Тураевское  
машиностроительное конструкторское бюро  
«Союз», ведущий инженер-конструктор

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Волгоградский государственный технический  
университет», г. Волгоград

Защита диссертации состоится «25» декабря 2020 года в 10 часов на заседании  
диссертационного совета Д212.125.10, федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»,  
Волоколамское ш., д. 4, г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального  
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,  
<https://mai.ru/events/defence>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д212.125.10  
к.т.н., доцент



Денискина Антонина Робертовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Конструктивно ракету-носитель (РН) можно разделить на несколько укрупненных элементов – это двигательная установка (ДУ), органы управления (ОУ), баки с компонентами топлива, переходные отсеки между ступенями, полезная нагрузка (ПН), носовой обтекатель (НО), элементы корпуса РН и ДУ, шпангоуты, переходной фланец для закрепления ПН и прочие силовые элементы, обеспечивающие взаимодействие и коммутацию вышеперечисленных элементов конструкции и прочих.

Все элементы РН можно разбить на две основные группы: активные – принимающие непосредственное участие в выполнении поставленной задачи (ДУ, ПН, ОУ и прочие); пассивные – обеспечивающие целостность системы (переходные отсеки, силовые шпангоуты, переходной фланец для закрепления ПН и прочие) и обеспечивающие безопасность системы (оболочки корпуса ДУ и РН, НО и прочие).

Группа пассивных элементов конструкций является необходимой для достижения поставленной задачи РН, но имеет и негативные качества – увеличение стартовой массы РН, что влечет за собой существенное уменьшение эффективной дальности полета РН и снижение коэффициента полезного действия (КПД) РН в целом.

Над решением данной проблемной области до сих пор ведутся различные исследовательские работы в различных странах мира, с целью уменьшения массы силовых элементов конструкции для увеличения эффективной дальности полета РН, увеличения массы доставляемой ПН на орбиту – увеличения КПД РН.

Разработка эффективных методов оптимизации силовых элементов конструкции и их адаптация к специфике ракетно-космической техники (далее РКТ) занимает важное место в области оптимального проектирования.

Проблемам оптимизации композиционных, стержневых, оболочечных и других типовых элементов конструкций, используемых в РКТ и авиации, посвящен ряд работ.

Наиболее сложными задачами проектирования оказываются задачи синтеза конструкций, топологической и мультидисциплинарной оптимизации, что наглядно представлено в современных научных работах. Решение данных задач позволяет на начальном этапе разработки определить оптимальные проектно-конструкторские параметры изделия, конструктивно-компоновочную и конструктивно-силовую схемы, изделия минимальной массы при условии обеспечения заданных требований прочности и жесткости конструкции РН.

Инструменты и методы топологической оптимизации (ТО) получили широкое распространение в отраслях производства авиационной и ракетно-

космической техники за счет своих неоспоримых преимуществ в области автоматизированного проектирования силовых элементов конструкций с минимально допустимой массой при условии сохранения заданного коэффициента запаса прочности.

В настоящее время топологическая оптимизация используется при концептуальном проектировании новых компонентов и полноценных изделия в различных областях техники, таких как аэрокосмическая, автомобильная или архитектура.

Применительно к аддитивным технологиям также растет спрос на инструменты топологической оптимизации. Данные технологии позволяют с минимальными затратами изготовить изделия бионического представления. Однако следует отметить, что при сочетании инструментов топологической оптимизации и аддитивных технологий возникает следующая проблема: результат топологической оптимизации не пригоден к производству в своем исходном представлении из-за наличия у электронной модели изделия «пилообразных» поверхностей, образовавшихся в процессе САЕ анализа из осколков конечно-элементной (КЭ) сетки. Данные поверхности представляют собой распределенный по всей поверхности модели массив концентраторов напряжений, который, если предварительно его не сгладить, будет перенесен на итоговую продукцию, что негативно повлияет на механические качества изделия, а также может повысить уровень износа ресурсов станка.

Существуют известные методы технологической подготовки к производству данного рода изделий – сглаживание оптимизированной электронной модели изделия, но они обладают рядом недостатков, которые не обеспечивают сходимость результатов и могут исказить результат оптимизации, что будет выражено в увеличении массы и снижении физико-механических свойств изделия (снижение коэффициента запаса прочности). Используемые методы доработки электронной модели изделия после ТО являются итерационными и трудоемкими. Что приводит к необходимости разработке научного метода, позволяющего формировать рациональную электронную модель изделия для аддитивного производства из трехмерной модели с «пилообразной» поверхностью, полученной по результатам топологической оптимизации, с использованием легко доступных инструментов и методов обработки данных на Российских предприятиях ракетно-космической отрасли.

**Актуальность** темы исследования определяется возможностью улучшения технологического процесса подготовки топологически оптимизированных изделий за счет разработки нового подхода реализации данного процесса с целью минимизации искажений результатов оптимизации и снижения затрат на последующую обработку изделия – повышение технологичности с целью уменьшения сухой массы летательного аппарата.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Предпосылкой для решения этой задачи является опыт разработки ракетно-космической техники, а также научно-методическая база. Её анализ показывает, что отдельные аспекты специфических проблем проектирования конструкции рассмотрены в работах Ю.С. Соломонова, Ю.М. Николаева, П.А. Оганесяна, С.Н. Шевцова, А.А. Боровикова, С.М. Тененбаума, О.Н. Тушева, Е.В. Красиловой, Н.А. Поповой и ряда других отечественных и зарубежных авторов, учёных АО «Корпорация «МИТ» и других ракетостроительных НИИ и ОКБ.

### **Цель и задачи исследования.**

**Цель исследования** – разработка научно-методического обеспечения геометрического моделирования элементов силовых конструкций летательного аппарата для подготовки процесса их изготовления с использованием аддитивных технологий.

#### **Задачи:**

1. Провести анализ процесса топологической оптимизации электронной модели элементов силовой конструкции летательного аппарата с учетом весовой эффективности и ограничений аддитивного производства.
2. Провести анализ существующих методов подготовки топологически оптимизированных электронных моделей изделий к их изготовлению с использованием аддитивных технологий.
3. Разработать методику и алгоритмы формирования геометрических моделей элементов силовых конструкций летательного аппарата для их аддитивного производства на основе послойного сглаживания контуров с учетом топологической оптимизации.
4. Провести апробацию предложенных методики и алгоритмов послойного сглаживания контуров изделия.
5. Выработать практические рекомендации по подготовке топологически оптимизированного изделия к аддитивному производству с учетом его технологических ограничений.

Решение поставленных задач обеспечит повышение качества проектно-конструкторских работ по созданию перспективной ракетной техники на этапах предварительного и технологического проектирования, снижение материальных и временных затрат при подготовке к производству изделий силовых конструкций летательных аппаратов с использованием аддитивных технологий.

**Объект исследования** – геометрическая модель детали силовой конструкции ракеты-носителя, полученная с использованием инструментов топологической оптимизации.

**Предмет исследования** – математические модели и методы сглаживания трехмерной геометрии электронной модели.

**Научная новизна исследования:**

Разработано научно-методическое обеспечение геометрического моделирования элементов силовых конструкций летательного аппарата для подготовки процесса их изготовления с использованием аддитивных технологий.

1. Определены области существования и применения альтернативных подходов к формированию геометрических моделей элементов силовых конструкций летательного аппарата для уменьшения их весовых характеристик.

2. Предложена методика послойного представления элементов силовых конструкций летательного аппарата, учитывающего закономерности между их конструктивно-технологическими параметрами.

3. Разработаны аналитические зависимости прогнозирования отклонения формы реального контура синтезируемого слоя изделия на этапе технологической подготовки аддитивного производства.

4. Разработаны методика и алгоритмы параметрического сглаживания трехмерной топологически оптимизированной электронной модели изделия с учетом технологических ограничений аддитивного производства.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в повышении качества проектно-конструкторских работ по созданию перспективной ракетной техники на этапах предварительного и технологического проектирования, снижение материальных и временных затрат при подготовке к производству изделий силовых конструкций летательных аппаратов с использованием аддитивных технологий.

**Методология и методы исследования.** Для решения вышеуказанных задач, при разработке методики и алгоритма сглаживания применялась декомпозиция задачи. Выявление рациональной последовательности процедур проектно-конструкторских решений для формирования плоского контура осуществлено на основе решения последовательных аналитических задач, возникающих на этапах технологической проработки электронной модели силового изделия летательного аппарата.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Решение задачи формирования геометрических моделей элементов силовых конструкций летательных аппаратов с учетом весовой эффективности.

2. Геометрические модели типовых элементов силовых конструкций летательных аппаратов.

3. Методика послойного сглаживания топологически оптимизированных контуров силовых изделий летательных аппаратов.

4. Процедуры формирования геометрических моделей элементов силовых конструкций, адаптированных для изготовления с использованием аддитивных технологий.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается: корректностью и обоснованностью допущений, принятых при разработке математической модели методики послойного сглаживания геометрии электронной модели изделия, прошедшей топологическую оптимизацию, для дальнейшего аддитивного производства; анализом достоверных и актуальных источников литературы, описывающих технологию аддитивного производства; апробированием методики послойного сглаживания геометрии; сходимостью полученных в диссертационной работе результатов с результатами экспериментов.

**Внедрение результатов работы.** Разработанные методика и алгоритм послойного сглаживания модели внедрены на предприятии АО «Корпорация «МИТ» (акт внедрения №1/12-18), а также в учебный процесс кафедры «Инженерная графика» МАИ.

**Апробация работы.** Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах МАИ и на различных российских и международных симпозиумах, конференциях и семинарах: 15-я и 16-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (Москва, 2016-2017 гг.); Конференция молодых специалистов АО «Корпорация «МИТ» (Москва, 2018-2019 гг.); Всероссийский молодежный конкурс научно-технических работ «Орбита молодежи» (Москва, 2018 г.)

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация объемом 170 страниц состоит из введения, 3-х глав, заключения, списка литературы из 94 наименований и 2-х приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** анализируется важность массового совершенства в РКТ и различные методы его достижения, в частном случае исследуется топологическая оптимизация. Обоснована актуальность предметной области, описаны методические и теоретические основы исследования, приведены полученные результаты, сформулирована практическая ценность диссертационной работы, а так же дана общая характеристика диссертации.

**Первая глава** посвящена обзору известных методов оптимизации конструкции, применительно к РКТ, а также описанию предпосылок целей и задач диссертационного исследования – проведен анализ исследуемой проблемной области.

В работе проведен анализ существующих видов аддитивных технологий. Выявлены ключевые достоинства и недостатки исследуемой технологии.

Достоинства аддитивных технологий:

- большинство геометрических параметров деталей можно изготовить с высокой точностью;

- использование широкого спектра металов, в том числе самых легких титановых сплавов и наиболее прочных никелевых жаропрочных сплавов, которые трудно обрабатывать традиционными производственными технологиями;

- отличные механические свойства, в ряде случаев превосходящие характеристики кованных металлических изделий;

- изготовленные детали можно подвергнуть дальнейшей механической обработке, покрыть, и обработать, как и изготовленные другими методами изделия.

Недостатки:

- высокая стоимость применяемых материалов, оборудования и его эксплуатации;

- необходимость закрепления деталей для предотвращения деформаций к строительной плите с помощью опорных конструкций, которые являются производственными отходами и требуют ручной постобработки для удаления;

- ограниченность размеров изделия (хотя они с каждым годом становятся все больше и больше);

- обработка металлических порошков может представлять опасность и требует строгого технического контроля.

Проанализированы технические особенности исследуемой технологии, влияющие на качество конечного продукта.

Поскольку 3D-принтер создает объект, накладывая один слой на другой с некоторым смещением, то после печати будет видна «лесенка», а не плавная кривая.

Данный эффект себя минимально проявляется на вертикальных поверхностях. В тоже время по мере увеличения угла наклона от вертикальной оси OZ эффект будет становиться более выраженным (Рисунок 1).

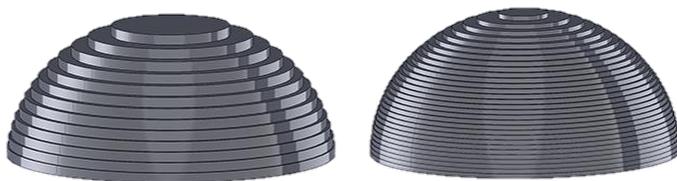


Рисунок 1 – Визуализация послойного представления модели, с учетом высоты слоя

Еще одной технической особенностью, влияющей на качество конечного продукта, является сам процесс плавления материала в слое с формированием значительного энергетического вклада. Качество поверхности изделия и его структура в таком процессе зависят от геометрической формы каждого сечения и стратегии его сканирования источником энергии – в данной работе рассматривается лазерное излучение.

Коротко можно упомянуть такие свойства, влияющие на качество конечного продукта, как размер фракции используемого порошка, свойства самого материала, интенсивность лазера, время воздействия лазера, особенности построения поддерживающих конструкций, траектория лазерного луча, величина размера ванны плавления, точность механизмов установки аддитивного производства, подогрев рабочей области, наличие или отсутствие защитной среды, качества оптической системы оборудования.

В настоящее время аддитивные технологии требуют подробного изучения влияния режимов синтеза, дисперсности порошка, толщины спекаемого слоя и других технологических ноу-хаи на физико-химические и механические свойства материалов, а также их стабильность при изготовлении деталей и эксплуатации. Несмотря на это, такие аддитивные технологии можно назвать перспективными для производства трудоемких, дорогостоящих узлов и силовых элементов сложной геометрии, полученных в результате топологической оптимизации.

В настоящее время известны основные методы топологической оптимизации (ТО): SIMP - Solid Isotropic Material with Penalization (метод твердого изотропного материала с пенализацией), BESO (ESO) - Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (метод двунаправленной эволюционной структурной оптимизации), Level-Set (метод установления уровня) и некоторые другие методы. Данные методы имеют особенности, но в то же время тесно связаны между собой.

SIMP - метод ТО реализован в программе «Solid Thinking Inspire», основополагающая идея которого заключается в создании поля виртуальной плотности в конечных элементах (КЭ) конструкции. Назначение метода состоит в уменьшении массы конструкции вследствие исключения материала в слабо нагруженных областях модели при известных граничных условиях (Рисунок 2).

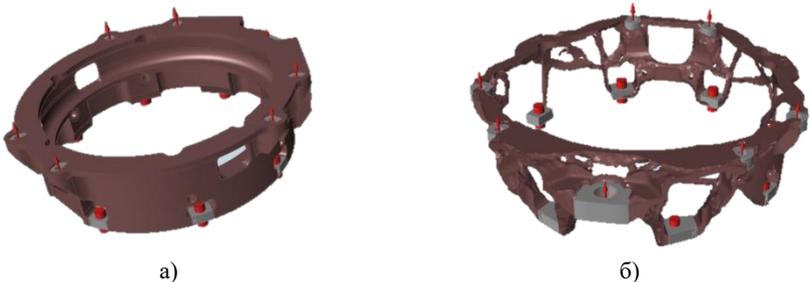


Рисунок 2 – Моделирование конструкции изделия:  
а – расчётная модель конструкции в программе Solid Thinking Inspire,  
б – результат её топологической оптимизации для осевого случая нагружения

Одним из перспективных методов ТО является метод теории адаптивной эволюции механических систем (ТАЭМС), который позволяет проводить ТО по критерию минимума потенциальной энергии деформации конструкции, первоначально имея лишь упрощенное представление о её геометрии (Рисунок 3).

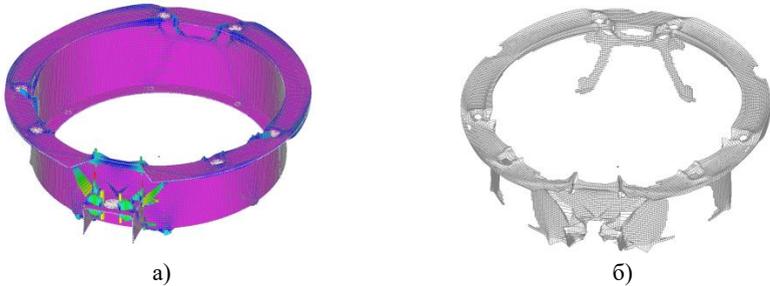


Рисунок 3 – Моделирование конструкции изделия:

*а* – результирующая оптимальная топология конструкции для всех случаев нагружения, *б* – сглаженная оптимальная форма конструкции для осевого случая нагружения

В отличие от SIMP-метода, метод ТАЭМС позволяет проводить поиск оптимальной топологии (вне зависимости от первоначальных толщин и их распределения) за счёт автоматизированного перестроения геометрии посредством наращивания или уменьшения толщин КЭ расчётной модели. При этом расчётная модель (предковая форма конструкции, относительно которой производится ТО), как правило, строиться на основе конструкторских ограничений по размещению аппаратуры, необходимым уклонам, вырезам и т.п., но ограничена моделированием конструкции посредством оболочечных КЭ.

Данные технологии позволяют с минимальными затратами изготовить изделия бионического представления. Однако следует отметить, что при сочетании инструментов топологической оптимизации и аддитивных технологий возникает следующая проблема: результат топологической оптимизации не пригоден к производству в своем исходном представлении из-за наличия у электронной модели изделия «пилообразных» поверхностей, образовавшихся в процессе CAE анализа из КЭ сетки. Данные поверхности представляют собой распределенный по всей поверхности модели массив концентраторов напряжений, который, если предварительно его не сгладить в ручном режиме, будет перенесен на итоговую продукцию, что негативно повлияет на механические качества изделия.

Можно выделить три ключевые проблемные области метода получения оптимальной геометрии изделия в рамках заданных условий нагружения и

закрепления, которые необходимо решить прежде, чем внедрять инструменты топологической оптимизации в производство. Первая проблема состоит в получении технологичного дизайна. Второй проблемой является надежная оценка общей стоимости многокритериального дизайна. Не только разные материальные затраты, но и стоимость самой оптимизации в проекте должны быть приняты во внимание. Третий вызов для инструментов топологической оптимизации – это необходимость решить проблему повышенной сложности производства в разумные сроки.

**Вторая глава** посвящена разработке метода послойного сглаживания электронной модели изделия.

***Анализ существующих решений.***

Существует несколько путей получения твердотельной электронной модели изделия:

- сглаживание путем преобразования КЭ сетки;
- использование результатов оптимизации в качестве концепции проектируемого изделия – реверс-инжиниринг;
- сглаживание построением NURBS-поверхностей (использование автоматизированных инструментов для проведения реверс-инжиниринга);
- сглаживание путем повторной оптимизации;
- использование сторонних продуктов.

Разнородность путей и методов получения пригодной к производству геометрии изделия, свидетельствует об отсутствии системного решения данного рода задач на производстве, вызванное наличием комбинации негативных факторов у тех или иных методов, что приводит к определенным сложностям в освоении технологии топологической оптимизации конструкций и их аддитивного производства.

***Математическая постановка задачи исследования.***

В общем виде математическую постановку задачи исследования можно представить как:

$$X^* = \text{ArgMin } F(x; u), \quad x \in X, \quad u \in U \quad (1)$$

где  $X$  – матрица исследуемых проектно-конструкторских решений;  $U$  – область ограничений, характеризующая текущий набор конструктивных решений;  $x = (m, \eta, Q, Ra)$  - вектор проектных параметров (масса изделия, коэффициент запаса прочности изделия при заданных условия закрепления и нагружения, уровень технологичности изделия, шероховатость поверхности изделия);

$u = \{m \leq m + |\Delta m_{\text{доп}}|; \eta \leq \eta + |\Delta \eta_{\text{доп}}|; Q > 1; Ra \leq Ra_{\text{доп}}\}$  – набор ограничений;  $F(x; u)$  – функция преобразования проектных параметров в рамках заданных допустимых ограничений.

Перед уточнением функции  $F(x; u)$ , был проведен анализ взаимозависимостей исследуемых параметров.

По результатам исследований изделий, полученных с использованием аддитивных технологий, была выявлена обратно пропорциональная зависимость уровня технологичности (Q) от шероховатости  $i$ -того слоя модели ( $Ra_i$ ), от которой зависит общий уровень шероховатости всего изделия. Вычисление шероховатости поверхности изделия представлено выражениями (2), (3)

$$Ra = \sum_1^n Ra_i \quad (2)$$

$$Ra_i = \frac{\sum_1^k |l_{j,k}|}{k} \quad (3)$$

где  $Ra_i$  – средне арифметическая величина отклонения контура сечения модели изделия от теоретической кривой на  $j$ -ом участке длиной  $L$ ;  $l_{j,k}$  – величина отклонения исходного контура модели от теоретической оптимальной кривой;  $L_j$  – длина исследуемого  $j$ -того сегмента  $i$ -того сечений модели;  $k$  – количество узловых точек, формирующих контур модели, на  $j$ -ом участке исходного контура плоского сечения модели;  $n$  – количество слоев модели, из которых она была сформирована в процессе 3D-печати.

Также было выявлено, что изменение шероховатости сечения модели, в процессе ее сглаживания, влечет за собой изменение площади сечения модели (S), путем заполнения углов, направленных в тело модели, и срезания углов, направленных от тела модели, что наглядно продемонстрировано на слое модели (Рисунок 4).

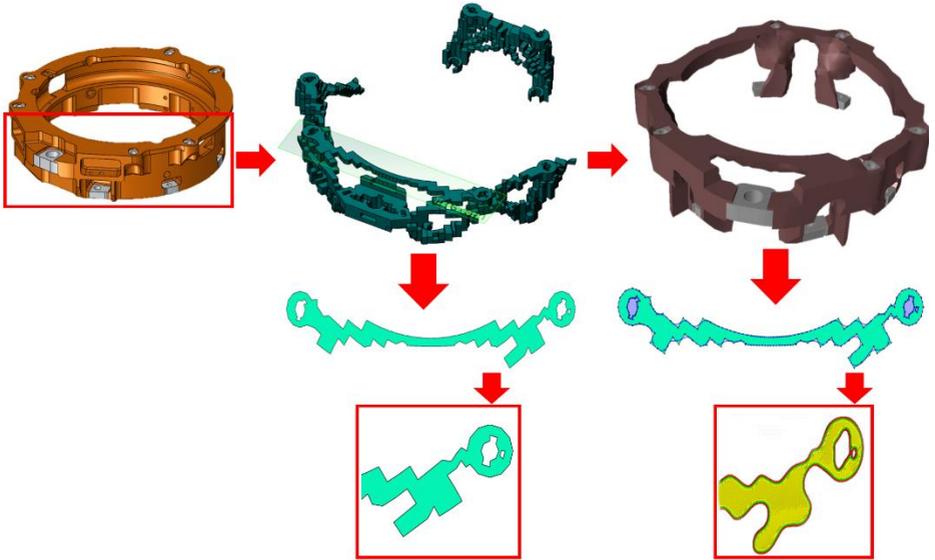


Рисунок 4 – Демонстрация изменения геометрии контура сечения модели при сглаживании и изменении уровня шероховатости контура сечения

Из выражений (4), (5) известно, что изменение площади сечений модели ведет к изменению параметров массы и прочности изделия (в частности при растяжении-сжатии), что продемонстрировано на Рисунке 5:

$$\left. \begin{array}{l} V = S \cdot h \\ m = V \cdot \rho \end{array} \right\} \Rightarrow m = S \cdot h \cdot \rho \quad (4)$$

$$\left. \begin{array}{l} \eta = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{\sigma} \\ \sigma = \frac{N}{S} \end{array} \right\} \Rightarrow \eta = \frac{S \cdot \sigma_{\text{пред}}}{N} \quad (5)$$

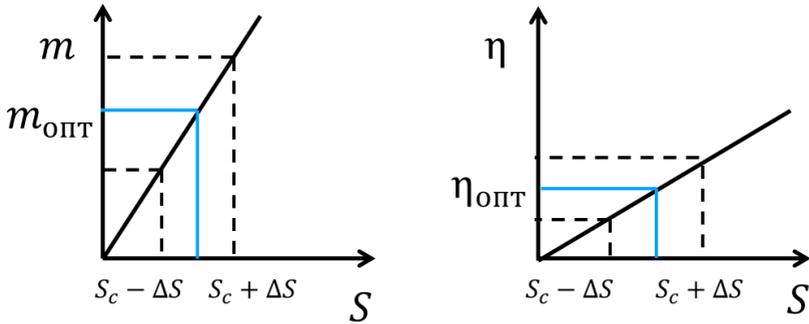


Рисунок 5 – Влияние изменения параметра площади сечения модели на параметры массы и прочности изделия:

$V$  – объем,  $S$  – площадь,  $h$  – высота,  $\rho$  – плотность,  $\sigma$  – действующие напряжения,  $\sigma_{\text{пред}}$  – предельно допустимые напряжения,  $N$  – усилие

***Методика послойного сглаживания.***

Результат анализа особенностей аддитивных технологий и инструментов топологической оптимизации выявил зависимость качества поверхности синтезируемых изделий, их массы и прочностных характеристик, а также требуемых затрат на производство от площади слоев, формируемых в результате обработки электронной модели изделия.

Предлагаемая методика послойного сглаживания геометрических моделей позволяет осуществить получить электронную модель изделия адаптированную к аддитивному производству, с сохранением результатов ТО (параметры массы и прочности) в рамках заданных диапазонов погрешности.

Методика послойного сглаживания формирует вспомогательные этапы технологической подготовки к аддитивному производству модели, прошедшей топологическую оптимизацию (Рисунок 6).

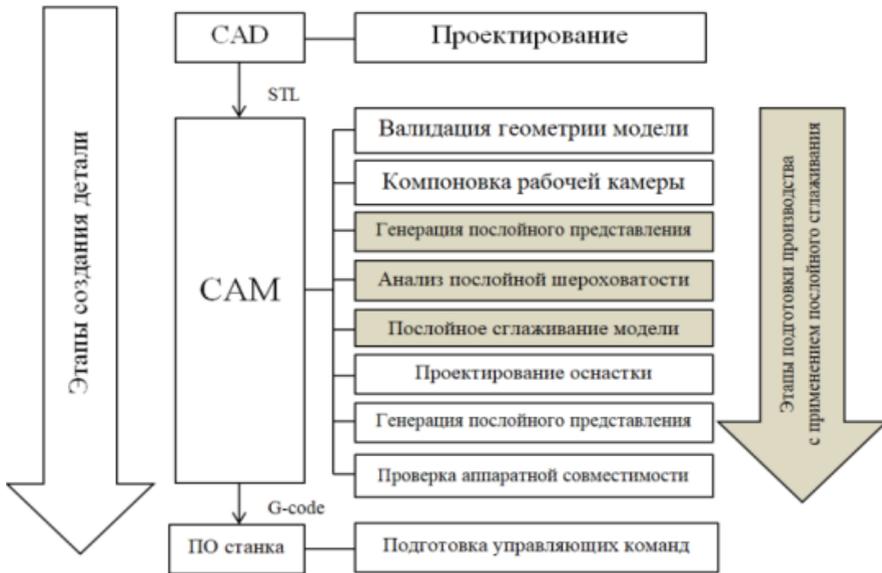


Рисунок 6 – Этапы подготовки аддитивного производства с использованием методики послойного сглаживания

В основу данной методики положен технологический процесс подготовки электронной модели изделия к аддитивному производству для современных и перспективных технологий аддитивного производства. Были внедрены три дополнительных этапа:

- 1)Предварительная генерация послойного представления модели изделия;
- 2)Анализ послойной шероховатости модели, для выявления необходимости обработки слоя, на основе предварительного послойного сглаживания;
- 3)Этап послойного сглаживания.

Для решения задачи предложена методика послойного сглаживания электронной модели изделия, учитывающая производственные и технологические особенности аддитивного производства топологически оптимизированных изделий:

$$G = \sum_{i=1}^n M_i(x, y) \cdot \Delta h_i \Rightarrow \sum_{i=1}^n F_i(x, y) \cdot \Delta h_i = \sum_{i=1}^n S_i \cdot \Delta h_i = G_c, \quad (6)$$

где исходная модель  $G$  представляется в виде последовательного набора плоских сечений, образованных массивом точек  $M_i$  с координатами  $x, y$ , описывающих внешний контур исходной модели в  $i$ -ом сечении. Далее набор сечений модели сглаживается функцией  $F_i(x, y)$ , при помощи которой будут получены замкнутые контура сечений, образующие площадь

( $S_i$ ). Булева сумма  $n$  сглаженных плоских сечений  $S_i$ , вытянутых на высоту технологического шага 3D-печати  $\Delta h_i$  образует послойно сглаженную модель  $G_c$ .

В качестве исходных данных для методики послойного сглаживания выступает геометрия электронной модели изделия, полученная путем топологической оптимизации.

Для реализации данного метода было необходимо определить функцию сглаживания плоского замкнутого контура сечения модели  $F(x, y)$ . Для ее определения был предложен ряд критериев:

1. функция должна обеспечивать возможность сглаживания замкнутого контура;
2. отсутствие необходимости ввода дополнительных начальных и конечных условий исследуемого контура для обеспечения работы функции сглаживания;
3. функция должна обеспечивать минимальное отклонение сглаженного контура от исходного.

Для контуров, представленных в виде матрицы размером  $N \times M$  положительные результаты, может дать их интерполяция тригонометрическим рядом Фурье. Это метод, который наиболее точно описывает контур на всех участках равномерной сетки (величина ячейки которой задана изначально). Не требующий ввода начальных и конечных условий, тем самым обеспечивая возможность дальнейшей автоматизации перебора каждого сечения трехмерной модели. А также позволяющий оценить контур, не разбивая на сегменты. Для этого использовалась следующая функция: `interpft` в продукте MatLab (Рисунок 7).

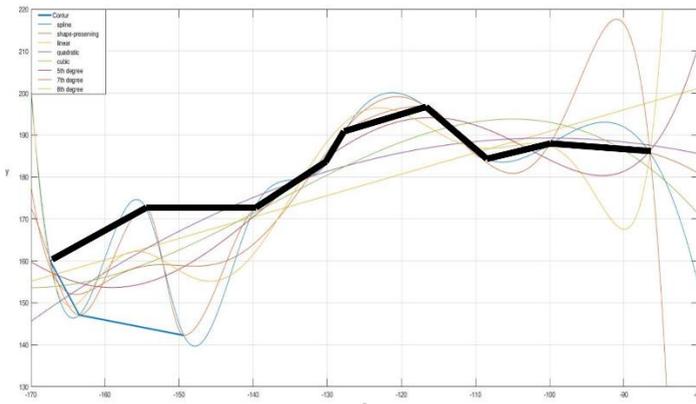


Рисунок 7 – Анализ существующих функций сглаживания на сегменте контура

Для наиболее эффективного метода сглаживания контуров рекомендуется использовать комбинированный метод, включающий в себя интерполяцию и

аппроксимацию на разных участках контура с дифференцированными зонами применения на неравномерной сетке, что в свою очередь требует создания специального программного обеспечения.

**В третьей главе** проводится практический эксперимент технологической подготовки к аддитивному производству модели, прошедшей топологическую оптимизацию, с использованием методики послойного сглаживания. Для этого был разработан специальный программный модуль на базе геометрического ядра СГМ SOLIDWORKS. Результаты практического применения модуля и методики послойного сглаживания сравниваются с результатами доступных решений исследуемой проблемной области в качестве доказательства эффективности предложенного решения.

Этапы проведения эксперимента, описанного в третьей главе, представлены в виде трех основных частей: этап выбора среды разработки и разработка программного модуля, этап проведения эксперимента, этап анализа результатов эксперимента.

В рамках *первого этапа* был проведен анализ существующих программных продуктов для технологической подготовки к аддитивному производству. Исходя из результатов анализа, было принято решение воспользоваться доступными API интерфейсами известных CAD продуктов и на основе их геометрического ядра реализовать прототип программного модуля, способного продемонстрировать преимущества методики послойного сглаживания в сравнении с прочими доступными и используемыми решениями на предприятиях ракетно-космической отрасли, например, в АО «Корпорация «МИТ».

Была выбрана СГМ SOLIDWORKS, исходя из следующих критериев качества:

- интерфейс прикладного программирования;
- широкие возможности по трехмерному моделированию;
- обмен данными с другими САПР (в т. ч. со специализированными программами для аддитивного производства и топологической оптимизации);
- широкая распространенность на отечественных предприятиях авиационной и ракетно-космической отрасли;
- наличие прикладных модулей инженерного анализа.

Для разработки программного модуля на основе геометрического ядра SOLIDWORKS была произведена декомпозиция задачи – сначала были сформулированы основные конечные функциональные возможности будущего программного обеспечения, а после был определен ряд последовательных задач, необходимых для достижения поставленной цели:

- анализ API интерфейса на предмет инструментов, позволяющих реализовать методику послойного сглаживания;

- получение внутренних данных об исследуемом геометрическом объекте;
- анализ особенностей полученных данных и их свойств;
- анализ возможностей взаимодействия и возможностей редактирования внутренних данных геометрии объекта;
- проведение эксперимента с редактированием «простого» набора данных и редактированием геометрических примитивов;
- усложнение программного кода и внедрение возможности редактировать модели сложной геометрической формы;
- оптимизация программного кода;
- разработка интерфейса для удобства взаимодействия оператора с модулем.

На *втором этапе* был проведен сам эксперимент, где сравнивались результаты сглаживания геометрии доступных решений и инструментов на предприятиях ракетно-космической отрасли России и разработанного модуля для послойного сглаживания. Для эксперимента разработаны модели силовых изделий конструкции ракеты (Рисунок 8).

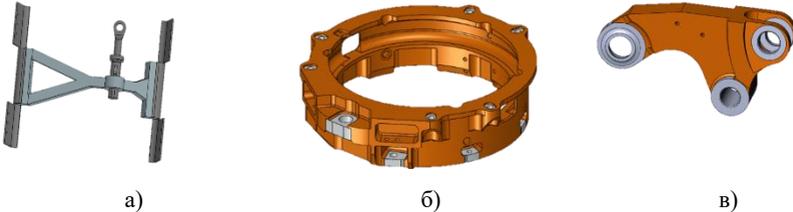


Рисунок 8 – Типовые изделия, силовой конструкции ракеты  
а) кронштейн, б) кольцо, в) качалка

Исходные данные для проведения эксперимента: электронные модели типовых силовых изделий ракеты-носителя с различными схемами закрепления, нагружения и различной геометрией для демонстрации работы разных методов в различных условиях. В результате эксперимента получены новые геометрические модели элементов силовых конструкций летательного аппарата и их характеристики (Рисунок 9).

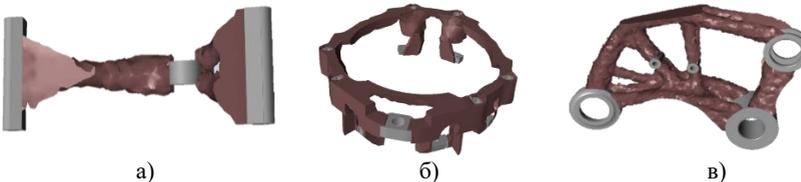


Рисунок 9 – типовые изделия, силовой конструкции ракеты

После проведения эксперимента. а) кронштейн, б) кольцо, в) качалка

Исследуемые методы:

- уменьшение КЭ-сетки до уровня погрешности станка (50 мкм);

- автоматизированный реверс-инжиниринг (NURBS-поверхности);
- реверс-инжиниринг (CAD-программа);
- разработанная методика послойного сглаживания.

В рамках исследования не были рассмотрены методы сглаживания геометрии с использованием дорогостоящего иностранного программного обеспечения с закрытым исходным кодом из-за их малого распространения на предприятиях ракетно-космической отрасли России, что обосновывается законом об импортозамещении.

Критерии оценки:

- процентное отклонение параметра массы модели;
- процентное отклонение параметра коэффициента запаса прочности модели;
- количество необходимых операций;
- затраченное машинное время (с использованием ПК инженера-конструктора);
- затраченное время работы оператора.

Результаты эксперимента представлены в таблице 1 и на рисунках 10-11.

Таблица 1. Результаты эксперимента послойного сглаживания геометрические модели элементов силовых конструкций летательного аппарата

	Сглаживание геометрии инструментами САПР (NURBS-поверхности )	Использование результатов топологической оптимизации в качестве шаблона	Разработанный метод послойного сглаживания
Необходимое количество операций	155	38	14
Затраченные человеко-часы	4 ч.	1,5 ч.	0,5 ч.
Геометрическое отклонение	13,95%	13,8%	6,2%

### Зависимость изменения запаса прочности от метода сглаживания



### Зависимость изменения массы модели от метода сглаживания

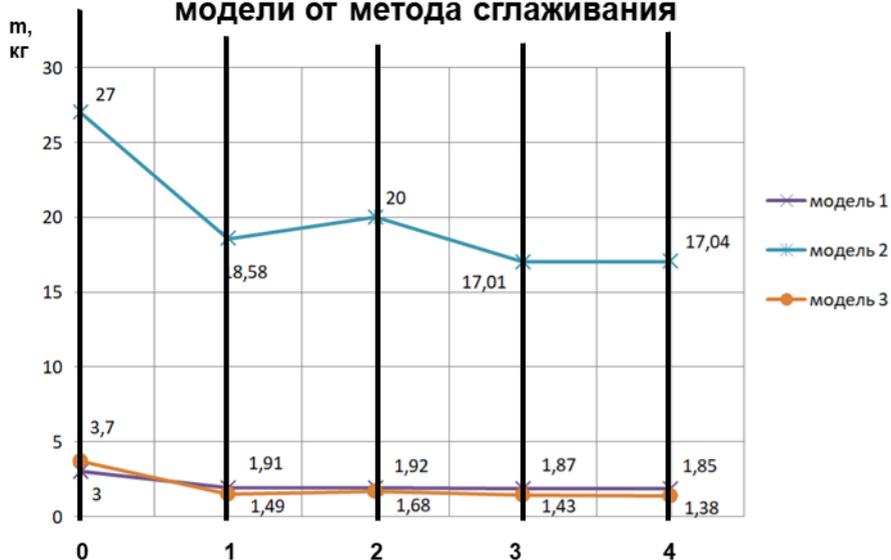
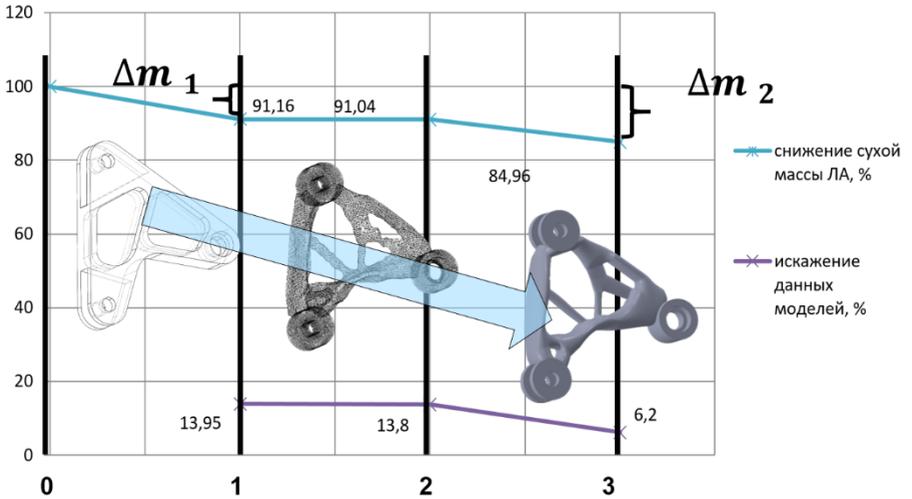


Рисунок 10 – изменение параметров массы и запаса прочности изделия в зависимости от выбранного метода доработки оптимизированной геометрии



- 0 – исходная модель**
- 1 – NURBS-поверхности**
- 2 – реверс-инжиниринг**
- 3 – послойное сглаживание**

$$\Delta m_2 > \Delta m_1$$

$$\Delta m_2 - \Delta m_1 = 6,08\%$$

Рисунок 11 – Демонстрация уменьшения сухой массы летательного аппарата в зависимости от выбранного метода сглаживания электронной модели силового изделия – процентного искажения результатов топологической оптимизации

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного диссертационного исследования разработано научно-методическое обеспечение геометрического моделирования элементов силовых конструкций летательного аппарата для подготовки процесса их изготовления с использованием аддитивных технологий.

Практическая значимость выполненного исследования заключается в повышении качества проектно-конструкторских работ по созданию перспективной ракетной техники на этапах предварительного и технологического проектирования, снижение материальных и временных затрат при подготовке к производству изделий силовых конструкций летательных аппаратов с использованием аддитивных технологий.

Проведен анализ процесса топологической оптимизации электронных моделей элементов силовой конструкции летательного аппарата. В результате анализа выявлены особенности топологической оптимизации модели изделия, позволяющие улучшить его весовые характеристики.

Проведен анализ существующих методов подготовки топологически оптимизированных электронных моделей изделий к их изготовлению с использованием аддитивных технологий. Выявлены ограничения аддитивного производства, связанные с изготовлением изделий силовых конструкций летательных аппаратов.

Разработаны методика и алгоритмы формирования геометрических моделей элементов силовых конструкций летательного аппарата для их аддитивного производства на основе послойного сглаживания контуров с учетом топологической оптимизации. Преимуществом разработанной методики является ее эффективность при использовании на этапах предварительного и технологического проектирования изделий ракетно-космической техники за счет уменьшения материально-временных затрат. При этом максимальный эффект от применения методики достигается при минимальной (грубой) конечно-элементной сетке, используемой на этапе топологической оптимизации геометрической формы элемента силовой конструкции летательного аппарата.

На основе методов топологической оптимизации разработаны геометрические модели типовых элементов силовых конструкций летательных аппаратов. Отличительной особенностью предложенных моделей является проведение полного цикла исследований, связанных с возможностью применения методики послойного сглаживания контура изделия.

Проведена апробация предложенных методики и алгоритмов послойного сглаживания контуров изделия. Разработанное алгоритмическое и программное обеспечение интегрировано в систему геометрического моделирования SolidWorks. В результате применения предложенных методики и алгоритмов автоматизирован процесс параметрического сглаживания трехмерной топологически

оптимизированной электронной модели изделия с учетом технологических ограничений аддитивного производства.

Выработаны практические рекомендации по технологической подготовке топологически оптимизированного изделия силовой конструкции летательного аппарата к аддитивному производству с учетом его технологических ограничений. Определен диапазон рациональных значений параметров, позволяющих увеличить весовую эффективность изделия на 10–15% при сохранении его прочностных характеристик.

Применение методики послойного сглаживания контуров изделий силовых конструкций летательных аппаратов позволит снизить массу всего летательного аппарата до 10% в зависимости от его типа.

Применение разработанного научно-методического обеспечения геометрического моделирования элементов силовых конструкций летательного аппарата для подготовки процесса их изготовления с использованием аддитивных технологий показало свою эффективность в первую очередь для процессов технологической подготовки аддитивного производства крупногабаритных заготовок с использованием послойной наплавки на оборудовании с большой рабочей зоной.

Перспективным направлением продолжения выполненного исследования является обобщение предложенной методики для синтеза параметров геометрического облика изделий летательных аппаратов при использовании для их производства новых материалов и технологий.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в рецензируемых научных изданиях**

1. Freylekhman, S.A. Smoothing the surface of the engineering model after topological optimization / S.A. Freylekhman, T.I.Mirolubova, A.V.Ripetskiy, E.V.Petrakova. - International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). Issue 10, October 2018, pp. 1200–1207 - Volume 9, Article ID: IJMET\_09\_10\_122.
2. Фрейлехман, С.А. Топологическая оптимизация объекта на основе трехмерного моделирования / С.А.Фрейлехман, Д.К.Лукомский, А.В.Рипецкий, Е.В.Петракова. - М: Изд-во: Общество с ограниченной ответственностью «Научные технологии», 2018. – 210с. – «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки» №11.
3. Freylekhman, S.A. Analysis of factors that determine the possibility for automation of smoothing of product electronic model, obtained through topological optimization for the purpose of its use in the technological preparation of additive manufacturing / S.A. Freylekhman, A.V.Ripetskiy, T.I.Mirolubova. - PERIÓDICO TCHÊ QUÍMICA, vol. 15. special issue - 1 – 2018, ISSN 2179-0302, p 405.

4. Фрейлехман, С.А. Конструирование деталей механической проводки летательных аппаратов в системе SOLID WORKS / Хотина Г.К. Фрейлехман С.А., Леонова С.А. // Вестник БГТУ. – 2019. – №2(75).

#### **Другие публикации**

5. Фрейлехман С.А. Методология подготовки электронной модели изделия для топологической оптимизации и аддитивного производства узлов и агрегатов авиационной и ракетно-космической техники. В кн.: Сборник тезисов и докладов: 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2016», М: МАИ, 2016.
6. Фрейлехман С.А. Методология проектирования и производства топологически оптимизированных изделий. В кн.: Сборник тезисов и докладов: 16-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2017», М: МАИ, 2017.
7. Фрейлехман С.А. Методология топологической оптимизации – классификация типовых ошибок при проектировании силовых конструкций ракетно-космической техники. В кн.: Сборник трудов конференции молодых специалистов АО «Корпорация «МИТ». М: АО «Корпорация «МИТ», 2018.
8. Фрейлехман С.А. Методика автоматизации технологического процесса подготовки электронной модели изделия к аддитивному производству. В кн.: Сборник трудов конференции молодых специалистов АО «Корпорация «МИТ». М: АО «Корпорация «МИТ», 2019.
9. Фрейлехман, С.А. Топологическая оптимизация конструкций РКТ / С.А.Фрейлехман, Д.К.Лукомский, С.А.Павлюченкова – Сборник материалов молодежной конференции – ООО «12 апреля», 2018. – 196 с. – Новые материалы и технологии для ракетно-космической и авиационной техники.
10. Фрейлехман, С.А. Топологическая оптимизация конструкций ракетно-космической техники / С.А. Фрейлехман, Д.К.Лукомский, С.А.Павлюченкова. – М: Изд-во Информационно-правовой центр "ЮрИнфоЗдрав" – 2018. – 217с. – Сборник материалов молодежной конференции: новые материалы для ракетно-космической и авиационной техники.