

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Куприяновой Янины Алексеевны на тему: «Методика рационального проектирования конструктивно-технологических решений силовых конструкций летательных аппаратов с использованием топологической оптимизации», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.13. «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов»

Диссертационная работа Куприяновой Я.А. посвящена рациональному проектированию силовых элементов конструкций летательных аппаратов (ЛА), с использованием метода топологической оптимизации (ТО). Предложена методика, позволяющая создавать конструкции, отвечающие требованиям прочности, аэроупругой устойчивости, минимума массы и их технологичности.

### Актуальность темы диссертации

В условиях глобальной конкуренции в авиационной отрасли разработка высокоэффективных конструкций ЛА является особенно актуальной задачей для отечественных производителей. Одной из ключевых проблем, возникающих при проектировании силовых конструкций ЛА, является оптимизация массы конструктивных элементов при сохранении необходимых прочностных характеристик. Решение данной задачи способствует значительному улучшению летных качеств аппаратов, повышению их экономической эффективности, а, следовательно, и их конкурентоспособности.

Одним из современных методов исследований в данной области является метод ТО, который не только автоматизирует процесс инженерного проектирования, но и позволяет выйти за рамки традиционных подходов. Этот метод способствует поиску новых, зачастую более эффективных конструктивных решений.

Диссертационная работа Куприяновой Я.А. ориентирована на разработку методики проектирования силовых конструкций агрегатов ЛА, основанной на методах топологической и параметрической оптимизации, с обязательным учетом технологических аспектов, что позволит находить наиболее предпочтительные конструктивные решения.

В диссертации поставлена и решена **научно-техническая задача**, разработки методики рационального проектирования конструктивно-технологических решений силовых элементов конструкций ЛА с использованием топологической оптимизации, что и является целью диссертационного исследования.

Для достижения поставленной цели Я.А. Куприяновой решены следующие частные задачи:

1. Проанализированы перспективные методы рационального проектирования и оптимизации конструкций ЛА с учетом комплекса функциональных и технологических ограничений для них.

2. Формализованы этапы топологической и параметрической оптимизации с учетом требований, предъявляемых к конструкциям ЛА.

3. Разработана методика рационального проектирования, которая реализована в задачах конструирования основных силовых элементов корпуса ЛА и его несущих поверхностей с учетом жесткости, прочности и минимума массы.

4. Исследовано влияние граничных условий оптимизации на результат проектирования конструкции силовой панели для бронирования двери вертолета из композитного материала с последующим проведением экспериментальных испытаний.

5. Расширенный вариант разработанной методики реализован в задаче проектирования конструктивно-технологического решения аэродинамического руля с учетом жесткости, прочности, аэроупругой устойчивости и минимума массы.

**Новизна научных результатов** диссертации Куприяновой Я.А. состоит в следующем:

- усовершенствован метод ТО для силовых элементов конструкций ЛА в части разработки структуры новых конечно-элементных моделей основных агрегатов ЛА, а так же формирования новых алгоритмов построения силовых схем по результатам ТО и постобработки результатов оптимизации с использованием аппроксимации функций;

- разработана методика рационального проектирования силовых элементов с учетом технологических ограничений для традиционных и аддитивных технологий;

- получены решения задачи минимизации массы, обеспечения жесткости и прочности для ряда силовых конструкций ЛА, таких как шпангоуты, силовые панели и несущие поверхности.

**Теоретическая значимость результатов исследования** заключается в развитии методологии рационального проектирования авиационных конструкций путем усовершенствования метода ТО, включая этапы формирования модели, выбора граничных условий и постобработки результатов, а так же создания методики проектирования силовых агрегатов ЛА с использованием структурной и параметрической оптимизации для производства их как традиционными, так и аддитивными методами.

**Практическая значимость** выражается в создании усовершенствованного инструментария выполнения проектно-конструкторских работ при разработке силовых конструкций ЛА (шпангоуты, панели и несущие поверхности), что позволяет повысить их конструктивно-технологическое совершенство и сократить затраты на разработку. Предложенный вариант аэродинамического руля минимальной массы и отвечающий требованиям аэроупругости, может быть использован в проектной практике.

### **Общая характеристика работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, перечня сокращений и условных обозначений, списка литературы и трех приложений. Общий объем диссертации составляет 139 страниц, работа содержит 44 рисунка и 11 таблиц. Список литературы включает 118 наименований.

**Во введении** диссертантом обоснована актуальность работы, рассмотрена степень разработанности темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертации, представлена научная новизна диссертационной работы, обоснована ее теоретическая и практическая значимость, указаны положения, выносимые на защиту, раскрыты достоверность, апробация полученных результатов и личный вклад автора.

**В первой главе** приведена классификация и дан обзор методов проектирования силовых конструкций ЛА. Рассмотрены особенности структурной оптимизации и общие принципы рационального проектирования, которые послужили основой для создания новой методики проектирования.

**Во второй главе** сформулирована постановка задачи исследования и предложена методика рационального проектирования с этапами ТО, постобработки ее результата и параметрической оптимизации. В качестве целевой функции ТО выбрана минимизация податливости конструкции, а ее итоговый объем является ограничением. Главной целью постобработки результата оптимизации является представление некоторой функции, описывающей положение элементов в пространстве, в аналитическом виде. Поставленная цель достигается решением задачи линейной аппроксимации таблично заданной функции. Для параметрической оптимизации, позволяющей получить рациональное конструктивно-технологическое решение силовых агрегатов ЛА минимальной массы, в качестве исходных данных используются размерные параметры, полученные после постобработки, а в качестве ограничения – прочность конструкции. Для оценки прочности конструкции применяется максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу.

**В третьей главе** приведены результаты реализации разработанной методики в задачах рационального проектирования силовых конструкций ЛА: двух типов шпангоутов и детали «Поддержка» для крепления бронепанели

двери вертолета. Полученные результаты показали эффективность предложенной методики в задачах проектирования основных силовых конструкций. Для силового шпангоута проведено сравнение конструкции, спроектированной с использованием методики рационального проектирования, с конструкцией, созданной с помощью стандартного алгоритма ТО без постобработки и последующей параметрической оптимизации. Применение предложенной методики позволило получить преимущество по массе конструкции 21%. Проектирование стыкового литьевого шпангоута показало общее снижение массы спроектированной конструкции 50% по сравнению с исходной деталью до оптимизации. На примере проектирования детали «Поддержка» для крепления бронепанели двери вертолета исследовано влияние граничных условий на результат ТО. Проведены прочностные испытания, в ходе которых получены результаты, удовлетворяющие поставленным задачам проектирования.

**В четвертой главе** решены задачи рационального проектирования несущих поверхностей ЛА с учетом требований жесткости, прочности, аэроупругой устойчивости и минимума массы. С помощью предложенной методики разработано рациональное конструктивно-технологическое решение конструкции крыла малого удлинения, изготавливаемого с помощью аддитивных технологий. Проведено сравнение спроектированной конструкции с типовой и установлено, что она будет иметь массу на 24% меньше чем изготовленная с помощью традиционных технологий. В ходе решения задачи проектирования рациональной конструкции аэродинамического руля, предложенная методика была расширена с учетом требования аэроупругой устойчивости. Сформирована силовая схема, учитывающая наличие в конструкции балансировочного носка. Исследован флаттер ЛА с целью определения зависимости критической скорости флаттера от параметров носка аэродинамического руля. Установлено, что оптимальными по массе являются рули с противофлаттерными балансирными в виде усиленной передней кромки шириной 66 мм в случае носка, постоянного по ширине, и средней шириной 58 мм в случае носка, линейно переменного по ширине. При этом масса оптимального с точки зрения аэроупругой устойчивости руля с переменной передней кромкой на 7% ниже массы руля с прямой передней кромкой. Таким образом, с помощью топологической и параметрической оптимизации найдено оптимальное решение задачи проектирования руля, отвечающего требованиям прочности, жесткости, аэроупругой устойчивости и минимума массы.

**В заключении** работы приведены обоснованные в диссертационной работе выводы и рассмотрены перспективы дальнейшей разработки темы.

**Достоверность** научных положений и полученных результатов обосновывается применением проверенных методов анализа напряженно-деформированного состояния и аэродинамических характеристик авиационных конструкций, Адекватность численных моделей, использованных в предложенной методике, подтверждена сравнением типовых конструкций с конструкциями, разработанными по защищаемой методике. Кроме этого, вариативность конструктивных параметров (прочности и массы) детали «Поддержка» для крепления бронепанели двери вертолета, спроектированной с помощью предложенной методики в ее топологическом многообразии, доказана в ходе испытаний на универсальной испытательной машине.

Апробация диссертационного исследования состоит в применении предложенной методики при проектировании таких силовых элементов ЛА, как шпангоуты и несущие поверхности. При этом полученные результаты демонстрируют возможность улучшения качества проектирования авиационных конструкций и снижения необходимых на него затрат.

Анализ оппонируемой работы говорит о высокой научной подготовке Куприяновой Я.А. и способности автора решать научно-технические задачи, имеющие теоретическую и практическую значимость.

По содержанию диссертации можно сделать следующие **замечания**:

1. В первой главе диссертации, на основе анализа известных литературных источников, целесообразно было бы подвести к необходимости постановки решаемой далее научно-технической задачи. Желательно иметь развернутые выводы по каждой из глав.

2. В работе не приводится сравнение используемого в методике алгоритма постобработки с другими существующими методами постобработки результата ТО.

3. Пункт 4 Заключения не отражает в полной мере результатов применения предлагаемой методики к проектированию панели для вертолета (раздел 3.3) в части вариативности ее топологии и соответствующих ей проектных параметров. Спорным является утверждение оптимальности одного из вариантов. На рисунке 3.17 перепутаны цветовые обозначения  $\Delta\sigma$  и  $\Delta m$ .

4. Заявленная во введении новизна предлагаемой конструкции руля должна подтверждаться патентом на полезную модель или на изобретение.

5. В диссертации не исследовано влияние явления дивергенции на проектируемую конструкцию крыла малого удлинения.

6. Четко не определены границы применения предложенной методики.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. В соответствии с п. 9 Постановления Правительства России от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке

присуждении учёных степеней», диссертант решил **важную, новую научную задачу**: разработал методику рационального проектирования конструктивно-технологических решений силовых конструкций ЛА с использованием усовершенствованного метода топологической оптимизации, позволяющую повысить качество проектирования авиационных конструкций, изготавливаемых как с применением традиционных, так и аддитивных технологий.

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались на 11 международных конференциях. По теме работы автором опубликовано шесть статей, из них четыре – в рецензируемых изданиях перечня ВАК при Минобрнауки России. Одна статья опубликована в международном журнале, индексируемом в международных реферативных базах данных Scopus.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и раскрывает ее основные положения.

Диссертационная работа удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Куприянова Янина Алексеевна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.13. Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов.

Профессор кафедры «Ракетное вооружение» ФГБУ ВО «ТулГУ»  
доктор технических наук, профессор



Ветров Вячеслав Васильевич

Адрес электронной почты: [vvvetr@mail.ru](mailto:vvvetr@mail.ru)

Телефон: +7 (919) 075-20-03

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Тулский государственный университет»

Почтовый адрес организации: 300012, г. Тула, пр. Ленина, д.92

Адрес официального сайта организации в сети «Интернет»: <https://tulsu.ru>

Адрес электронной почты организации: [info@tsu.tula.ru](mailto:info@tsu.tula.ru)

Телефон: +7 (4872) 734-444

Подпись Ветрова Вячеслава Васильевича

*С отзывом ознакомлена*  
*Куприянова Я.А.*  
*01.11.2024*

