

О Т З Ы В

официального оппонента Ефимова Вадима Викторовича на диссертационную работу Левченкова Михаила Дмитриевича «Методика оценки статической прочности сетчатых конструкций планера со структурной нерегулярностью на основе многоуровневых автоматизированных конечно-элементных моделей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

Актуальность темы

Современные тенденции в авиастроении характеризуются ужесточением требований к экономичности, экологичности и безопасности летательных аппаратов (ЛА), что обуславливает необходимость поиска принципиально новых путей снижения массы планера. Опыт создания таких самолетов, как Boeing-787 и Airbus-350, показал, что применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в рамках традиционных обшивочных конструктивно-силовых схем (КСС) типа «black metal» не позволяет в полной мере реализовать весовой потенциал композитов. Это связано с фундаментальными проблемами, присущими слоистым структурам: низкими деформационными свойствами связующих, многоуровневыми концентрациями напряжений и высокой чувствительностью к ударным воздействиям. В этой связи исключительную актуальность приобретают исследования, направленные на разработку новых КСС, которые позволяли бы нивелировать недостатки ПКМ и максимально использовать их высокие удельные прочностные характеристики.

Диссертационная работа М.Д. Левченкова посвящена решению данной задачи путем развития и исследования перспективных сетчатых (анизотридных) КСС с управляемой структурной нерегулярностью. Предложенный автором подход позволяет гармонизировать прочностные и жесткостные характеристики конструкции с уровнем внешнего нагружения, что открывает путь к дальнейшему снижению массы конструкции без ущерба для прочности. Разработанный в диссертации подход нацелен на применение на начальных этапах исследования конструкции, когда требуется проанализировать большое количество альтернативных вариантов конструктивных решений. В связи с этим основным требованием к алгоритму оценки прочности является оперативность при достаточной точности. В соответствии с этими требованиями автором разработана методика оценки прочности, совмещающая точность и универсальность решений методом конечных элементов и быстро-

действие от использования современных методов распараллеливания расчетов. Таким образом, диссертационная работа М.Д. Левченкова, несомненно, является актуальной.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что:

1. Разработан новый метод гармонизации запасов прочности и устойчивости сетчатых композитных отсеков с уровнем внешнего нагружения за счет создания структурной нерегулярности путем изменения угла спиральных ребер по длине и в поперечном направлении.

2. Создана новая оперативная методика и программный алгоритм для оценки статической прочности сетчатых отсеков и панелей с регулярной и нерегулярной структурой на основе многоуровневых автоматизированных параметрических конечно-элементных моделей.

3. Получены новые параметрические зависимости влияния параметров нерегулярности на прочностные, жесткостные и массовые характеристики отсеков крыла и фюзеляжа, расширяющие научно-технический задел в области легких авиационных конструкций.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что разработанная методика анализа прочности позволяет проводить анализ сетчатых конструкций на предварительных этапах исследований. Практическая значимость подтверждена актами о внедрении результатов диссертации и программы для ЭВМ и использованием разработанных алгоритмов в научных проектах.

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждается их успешной валидацией на экспериментальных данных.

По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 3 – в изданиях из перечня ВАК, и 2 – в высокорейтинговых изданиях (Scopus Q2). Зарегистрирована одна программа для ЭВМ. Основные результаты докладывались на 5 российских и международных конференциях.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 101 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты научная новизна и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту. Дана краткая характеристика состояния исследований в данной области как в России, так и за рубежом.

Глава 1 содержит глубокий аналитический обзор и критический анализ существующих исследований в области сетчатых конструкций, эволюцию их развития и применения. Автор четко идентифицирует ключевую проблему регулярных сетчатых структур – наличие избыточных запасов прочности в слабо- и высоконагруженных зонах – и аргументированно обосновывает целесообразность перехода к нерегулярным структурам для повышения жесткостных характеристик без дополнительных весовых затрат и увеличения весовой эффективности. Сформированы расчетные условия прочности и структура метода гармонизации, а также рассмотрены вопросы декомпозиции и распараллеливания вычислительных процессов.

Глава 2 является ключевой методической частью работы. В ней представлены разработанные автором метод гармонизации прочностных характеристик за счет изменения угла спиральных ребер по длине и поперечному сечению отсека и методика анализа прочности нерегулярных сетчатых отсеков. Детально описана трехуровневая система конечно-элементных моделей различного уровня детализации, их назначение, алгоритмы взаимодействия и передачи данных между уровнями. Особого внимания заслуживает проведенная адаптация методики к существующему в ЦАГИ четырехуровневому алгоритму комплексного анализа прочности конструкции планера с альтернативными КСС, что позволяет проводить корректный сравнительный анализ конструкций с традиционными обшивочными и сетчатыми КСС. Разработанная в данной главе процедура увеличения производительности вычислительного процесса, включая специализированную систему кластеризации, являются важным практическим результатом, обеспечивающим практическую реализуемость трудоемких параметрических исследований.

Глава 3 посвящена валидации разработанного метода и методики. Автор проводит сравнительный анализ результатов расчетов с данными натурных экспериментов для сетчатых оболочек. Валидация выполнена для всех трех уровней конечно-элементной модели, что подтверждает корректность моделирования как интегральных жесткостных характеристик (уровень 1), так и напряженно-деформированного состояния каркаса (уровень 2), а также местной устойчивости отдельных элементов сетчатого каркаса (уровень 3). Погрешности не превышают допустимых для практического применения значений. В данной главе также представлены параметрические исследования, наглядно демонстрирующие положительное влияние структурной нерегулярности на прочностные, жесткостные и массовые характеристики отсеков и панелей.

Глава 4 содержит результаты применения разработанного инструментария для решения прикладных задач в рамках проектов по созданию перспективных летательных аппаратов. Проведенный сравнительный анализ альтернативных КСС показал значительный весовой выигрыш нерегулярных сетчатых структур для отсека дозвукового пассажирского самолета по сравнению с металлическими аналогами. Полученный Парето-фронт для отсека фюзеляжа перспективного сверхзвукового пассажирского самолета с удлиненным носовым отсеком фюзеляжа наглядно иллюстрирует преимущества нерегулярных структур в обеспечении лучших жесткостных характеристик.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы, которые являются обоснованными и достоверными.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

К отдельным **недостаткам** работы, не умаляющим ее общей высокой оценки, можно отнести следующие:

- на странице 40 диссертации для описания жесткости на кручение используется формула, применяемая для жесткости на изгиб;

– в диссертации автор ссылается на Авиационные правила АП-25, хотя уже с 1 января 2023 года вступили в действие Нормы летной годности НЛГ 25;

– при анализе весовой эффективности сетчатых КСС для крыла (параграф 4.3) отсутствует детализированное сравнение с современным композитным аналогом типа «black metal», приведено сравнение только с металлическим вариантом;

– в тексте диссертации встречаются грамматические ошибки (например, стр. 27 4-й абзац) и стилистические ошибки (использование разных терминов для одних и тех же понятий, например, «весовые характеристики» и «массовые характеристики»).

Указанные замечания носят частный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Таким образом, диссертация «Методика оценки статической прочности сетчатых конструкций планера со структурной нерегулярностью на основе многоуровневых автоматизированных конечно-элементных моделей» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Левченков Михаил Дмитриевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

Официальный оппонент,
профессор кафедры аэродинамики, конструкции и прочности летательных аппаратов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА),
доктор технических наук, доцент,
контактные данные: 125993, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20, каб. 105А, тел.: 8 (499) 459-07-37, e-mail: v.efimov@mstuca.ru


(подпись) Ефимов Вадим Викторович
(Ф.И.О. полностью)
« 1 » декабря 2025 г.

Подпись Ефимова Вадима Викторовича заверяю.

Начальник управления персоналом



Бунин А.В.

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, доцента, директора Акционерного общества «Центр перспективных разработок» Склезнева Андрея Анатольевича на диссертационную работу Левченкова Михаила Дмитриевича «Методика оценки статической прочности сетчатых конструкций планера со структурной нерегулярностью на основе многоуровневых автоматизированных конечно-элементных моделей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

Диссертация посвящена **актуальной** проблеме оперативной оценки прочности перспективных сетчатых композитных авиаконструкций со структурной нерегулярностью на начальном этапе проектирования, когда требуется исследовать большое количество альтернативных вариантов конструктивно-технологических решений. В связи с этим основным требованием к алгоритму оценки прочности является повышение оперативности при сохранении достаточной точности. Следует отметить также необходимость решения новых задач прочности сетчатых конструкций с управляемой нерегулярностью, чему в работе уделено первостепенное внимание.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и четырёх приложений.

Во **введении** обоснована актуальность, обозначены научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, поставлена цель и обозначены задачи исследования, определены положения, выносимые на защиту. Кратко изложено состояние исследований по данной тематике.

В **главе 1** дан обзор основных направлений развития сетчатых композитных конструкций. В главе описаны причины появления новых задач прочности для сетчатых конструкций с структурной нерегулярностью и возможные способы их решения. Результаты исследования представлены последовательно на трёх уровнях детализации конструкции планера ЛА: уровне планера, уровне отсеков и уровне отдельных панелей и локальных зон конструкции. Показаны преимущества нерегулярных сетчатых КСС в обеспечении прочности композитной конструкции при высокой весовой эффективности.

Глава 2 посвящена разработке методики оценки прочности сетчатых реберных отсеков со структурной нерегулярностью. Приведены основные принципы, заложенные в алгоритм, позволяющие обеспечить существенное снижение трудоемкости и сокращение времени подготовки расчетных моделей, проведения расчетов и анализа результатов.

Глава 3 посвящена валидации разработанного метода и методики на экспериментальных данных, а также получению параметрических зависимостей прочности сетчатых конструкций от приведенных параметров нерегулярности.

В главе 4 приведены результаты прочностных исследований перспективных сетчатых КСС летательных аппаратов, выполненных на основе разработанной методики и представляющих для проектных организаций наибольший практический интерес. Данные задачи были решены в рамках проектов по созданию перспективной отечественной авиационной техники, а также международных кооперационных проектов. Основной целью данных исследований было оперативное получение решений типовых задач для альтернативных, перспективных вариантов авиаконструкций.

В заключении представлены основные выводы по полученным результатам, которые являются вполне обоснованными и не вызывающими сомнения.

Оформление диссертации и автореферата в целом соответствует требованиям ГОСТ 7.011-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления». Автореферат диссертации корректно отражает её содержание. Список цитируемой в диссертации литературы из 140 наименований, в том числе 32 зарубежных публикаций, свидетельствует о глубоком изучении соискателем рассматриваемой проблемы.

Новизна и достоверность полученных результатов

Новые научные результаты, полученные в диссертации, заключаются в следующем:

1. Предложен новый метод гармонизации запасов статической прочности сетчатых композитных отсеков с уровнем внешнего нагружения за счет изменения углов спиральных ребер по длине и в поперечном направлении отсеков;
2. Создана новая оперативная методика оценки статической прочности композитных сетчатых отсеков и панелей с нерегулярной структурой на основе многоуровневых автоматизированных параметрических КЭ моделей;
3. Получены новые параметрические зависимости влияния параметров нерегулярности на прочностные характеристики композитных сетчатых отсеков крыла и фюзеляжа.

Достоверность результатов и разработанного метода оценки статической прочности обеспечивается согласованием расчётных результатов с опубликованными экспериментальными результатами по сетчатым конструкциям.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что разработанный алгоритм и созданная на его основе программа позволяют снизить время и трудозатраты оценки прочности перспективных сетчатых

композитных конструкций планера и были внедрены в АО «ЦНИИСМ» и КНИТУ-КАИ.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается валидационными исследованиями алгоритма, а также хорошим соответствием результатов моделирования с опубликованными результатами экспериментальных исследований сетчатых оболочек.

Автором опубликовано 10 печатных работ, из которых 3 – в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ, 2 – в трудах международных конференций, входящих в базу Scopus, что подчеркивает достаточную апробацию полученных результатов.

Диссертация хорошо структурирована, написана технически грамотным языком. Результаты диссертации могут быть использованы разработчиками авиационной техники при проведении предварительных проектировочных исследований перспективных самолетов.

Замечания по диссертационной работе:

- 1) При анализе весовой эффективности сетчатых КСС для крыла регионального самолета отсутствует сравнение с современным композитным аналогом обшивочного типа;
- 2) В работе преимущественно исследован линейный закон изменения угла наклона спиральных ребер. Не представлено развернутого обоснования выбора именно этого закона и не рассмотрены в сравнительном аспекте альтернативные подходы, такие как степенные зависимости с различными показателями. Использование нелинейных законов могло бы обеспечить большую гибкость в гармонизации напряженно-деформированного состояния и привести к более оптимальным решениям;
- 3) Ещё одним важным вопросом, оставшимся вне рассмотрения, является использование различных композиционных материалов с разными соотношениями прочности и жесткости. В настоящей работе при оценке прочности и веса рассмотрен лишь материал со среднемодульным волокном, в то время как высокомодульные волокна обладают потенциалом к дальнейшему увеличению весовой эффективности;
- 4) Недостаточно подробно описаны способы перебора параметров (алгоритмы оптимизации), применяющиеся в методе гармонизации.

Данные замечания носят частный характер и не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение

На основе анализа материалов диссертации и автореферата, а также замечаний, приведённых выше, можно сделать вывод, что диссертационная работа Левченкова Михаила Дмитриевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании полученных автором теоретических и практических разработок решена научная задача, имеющая

важное практическое значение для развития авиа-космической промышленности и создания новых высокоэффективных силовых конструкций авиационной техники – сетчатых композитных конструкций планера летательного аппарата.

Работа выполнена и оформлена на высоком научно-техническом уровне, не содержит недобросовестных заимствований. Представленные результаты являются оригинальными и обоснованными.

Таким образом, диссертационная работа соответствует паспорту специальности, полностью удовлетворяет требованиям и критериям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным п.п.9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а её автор, Левченков Михаил Дмитриевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

Я, Склезнев Андрей Анатольевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой Левченкова Михаила Дмитриевича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент – доктор технических наук (научная специальность 2.5.13. – Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов), доцент (2.5.13), директор АО «Центр перспективных разработок»



Склезнев Андрей Анатольевич
«24» 11 2025 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (963) 782 50 25, эл. почта: skleznev@crism-cat.ru

Место работы:

141371, Московская обл., Сергиево-Посадский г.о., г. Хотьково,
ул. Черняховского, д. 18Б, помещение 36.

Акционерное Общество «Центр перспективных разработок»,
тел.: +7 (499) 707-74-90, эл. почта: mail@crism-cat.ru

Подпись Склезнева Андрея Анатольевича заверяю

Заместитель директора по
организационным вопросам
(должность)



Кондратенко И.С.
(Ф.И.О.)