

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Федулова Бориса Никитовича на диссертационную работу Бессонова Павла Сергеевича на тему: «Разработка алгоритмов анализа нагружения авиационных конструкций в задачах оценки усталостной долговечности», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

Актуальность избранной темы

Проблема определения усталостной долговечности авиационных конструкций сохраняет свою фундаментальную и практическую значимость на протяжении всей истории авиастроения. В условиях современного этапа развития отрасли, характеризующегося ростом требований к экономической эффективности эксплуатации при безусловном обеспечении безопасности полетов, традиционные консервативные подходы к назначению ресурса требуют совершенствований. Особую остроту эта проблема приобретает в связи с массовым внедрением полимерных композиционных материалов, демонстрирующих принципиально иные механизмы разрушения по сравнению с классическими металлическими сплавами.

Диссертационная работа Бессонова Павла Сергеевича направлена на решение актуальных задач анализа нагружения, возникающих на различных этапах оценки усталостной долговечности, включая корректный учет параметров циклов нагружения при спектральном представлении нагрузок, определение усталостных характеристик трещиностойкости слоистых композиционных материалов и оценку эксплуатационных нагрузок. Разработка алгоритмов, позволяющих повысить точность прогнозирования ресурса при одновременной автоматизации трудоемких расчетных процедур, представляет не только научный интерес, но и имеет стратегическое значение для совершенствования методов обеспечения прочности в отечественном авиастроении.

Содержание работы

Диссертационная работа Бессонова Павла Сергеевича представляет собой законченное научное исследование, состоящее из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Структура работы логична и отражает последовательность решения поставленных задач: от аналитического обзора и выявления проблем к разработке и апробации конкретных алгоритмов.

Во **введении** обоснована актуальность задач анализа нагружения авиационных конструкций. Сформулированы цель, задачи и научная новизна работы, заключающиеся в разработке трех алгоритмов для различных этапов оценки усталостной долговечности. Приведены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен системный анализ современных методов оценки нагружения на всех этапах жизненного цикла ЛА. Выявлены ключевые проблемы: ограниченность спектральных методов, высокая трудоемкость испытаний ПКМ и отсутствие решений для мониторинга нагруженности нелинейных элементов (шасси) транспортных самолетов. На основе анализа сформулированы задачи исследования.

Во **второй главе** предложен алгоритм, использующий метод Монте-Карло для статистического моделирования временных реализаций по спектру плотности мощности. Это позволяет применять физически обоснованные модели накопления повреждений (метод «дождя», формула Одингга) к данным в частотной области. Верификация показала погрешность не более 10.5%.

В **третьей главе** разработан автоматизированный алгоритм определения усталостных характеристик ПКМ по моде II. Учтены физические особенности развития расслоений: предложена фильтрация данных полиномом 25-й степени и введен корректирующий множитель для исключения нефизичного уменьшения длины трещины. Апробация показала изменение характеристик трещиностойкости до 105%.

В **четвертой главе** разработан алгоритм на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) для прогнозирования нагрузок на шасси по данным бортового регистратора. Установлено преимущество двунаправленных рекуррентных сетей (biGRU), обеспечивающих ошибку прогноза нагрузок $\approx 15\%$ и ошибку оценки повреждаемости $\approx 13\%$.

В **заключении** подведены итоги работы, сформулированы основные выводы и перспективы дальнейших исследований.

Обоснованность, достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность научных положений и результатов работы подтверждается комплексной экспериментальной проверкой, включающей использование репрезентативных данных лабораторных и лётных экспериментов на всех этапах исследования – от разработки до верификации алгоритмов, сопоставление с эталонными методами анализа, а также статистически обоснованной обработкой результатов.

Обоснованность научных выводов и практических рекомендаций базируется на установленных причинно-следственных связях между

полученными результатами и сделанными заключениями, а также, подтверждается эффективностью предложенных алгоритмов при решении реальных инженерных задач. Ключевым аргументом, усиливающим обоснованность выводов, является их успешная практическая реализация, документально подтвержденная актами внедрения в деятельность профильных предприятий авиастроительной отрасли.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Интеграция физически обоснованных моделей накопления повреждений, используемых в отечественном авиастроении при определении усталостной долговечности конструкций ЛА по спектральным данным о нагрузках.
2. Учёт физических особенностей развития расслоения в образце из ПКМ при определении расчётных характеристик ПКМ по моде сдвига.
3. Использование сетей с рекуррентными блоками при определении нагруженности шасси транспортного самолёта.

Предложенные решения позволяют преодолеть ряд методологических ограничений, существующих в традиционных подходах к оценке усталостной долговечности.

Теоретическая и практическая значимость

Научная значимость работы имеет выраженный теоретико-прикладной характер и проявляется одновременно в нескольких аспектах: с теоретической стороны — в развитии методов сопротивления усталости через создание новых алгоритмов анализа нагружения авиационных конструкций; с практической стороны — в создании и внедрении зарегистрированного программного обеспечения, обеспечивающего снижение трудоёмкости расчётных операций, повышение точности оценки ресурса конструкций и создающий основу для перехода к предиктивной системе технического обслуживания летательных аппаратов.

Замечания по диссертационной работе

1. Разработанный во второй главе алгоритм оценки усталостной долговечности, основанный на статистическом моделировании временных реализаций методом Монте-Карло по спектральной плотности мощности, наследует фундаментальное ограничение спектральных методов — ориентацию на анализ гауссовских процессов. Для повышения методологической строгости целесообразно было бы оценить погрешность оценки долговечности для процессов с «тяжелыми хвостами» распределения или явно оговорить это ограничение.

2. Выводы о значительном уточнении параметров трещиностойкости, полученные в третьей главе работы, представляются перспективными, однако для их полного подтверждения целесообразно дополнительное экспериментальное исследование с применением независимых методов контроля длины трещины на промежуточных этапах нагружения. Такая проверка особенно актуальна в связи с тем, что основным результатом методики является определение производной da/dN , где предложенная коррекция может вносить существенный вклад в точность расчетов.
3. Предложенная в четвертой главе процедура отбора параметров бортового регистратора, основанная на экспертной оценке, успешно решила поставленные задачи в рамках данного исследования, однако она ограничивает потенциал автоматизированного применения разработанной методики для других конструкций ЛА. В перспективе дальнейшего развития методики представляет интерес разработка формализованного алгоритма селекции признаков, что позволит расширить область применения подхода для анализа других элементов конструкции летательных аппаратов без необходимости привлечения узкоспециализированных экспертов.

Приведенные замечания носят характер рекомендаций, направленных на дальнейшее совершенствование представленных в диссертации методов и алгоритмов. Высказанные предложения могут быть учтены автором при продолжении исследований в данной научной области и развитии полученного научного задела. Отмеченные вопросы не влияют на общую положительную оценку работы и не умаляют ее научной ценности и практической значимости.

Заключение

Диссертационная работа Бессонова Павла Сергеевича представляет собой завершенное научное исследование, в котором решен актуальный научно-технический комплекс задач по разработке алгоритмов анализа нагружения авиационных конструкций для оценки усталостной долговечности.

Основные научные результаты и выводы работы характеризуются новизной, теоретической и практической значимостью. Личный вклад автора заключается в непосредственном выполнении теоретических и экспериментальных исследований, разработке алгоритмов и программного обеспечения, обработке и анализе полученных результатов.

Высказанные в отзыве замечания носят частный характер и не влияют на общую положительную оценку работы. Они могут быть учтены автором в его дальнейшей научной деятельности.

Диссертация и автореферат соответствуют требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор, Бессонов Павел Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

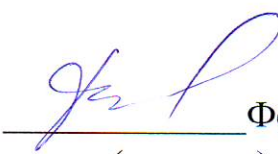
Официальный оппонент:

Федулов Борис Никитович, д. ф.-м.н. (01.02.04), профессор кафедры Теории пластичности Механико-математического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова.

Адрес организации: 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1,

Телефон: +7 (495) 939-10-00

«12» 11 2025 г.


Федулов Б.Н.
(подпись)

Подпись официального оппонента  Андрей Игоревич Шафаревич
Б.Н. Федулова заверяю
декан механико-математического
факультета, член-корреспондент РАН,
профессор



ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата технических наук Ерпалова Алексея Викторовича на диссертационную работу Бессонова Павла Сергеевича на тему «Разработка алгоритмов анализа нагружения авиационных конструкций в задачах оценки усталостной долговечности», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

Актуальность темы исследования

Проблема усталостного разрушения остается одним из ключевых факторов, ограничивающих срок службы летательных аппаратов и влияющих на экономику их эксплуатации. Современные тенденции в авиационной отрасли направлены на оптимизацию расходования ресурса, что требует точного анализа нагружения конструкции на всех этапах жизненного цикла. Особую актуальность приобретают задачи, связанные с переходом от регламентного обслуживания к предиктивной модели, основанной на фактическом накоплении повреждений. В этой связи диссертационная работа Бессонова П.С., посвященная разработке алгоритмов анализа нагружения и оценки усталостной долговечности авиационных конструкций, представляется своевременной и актуальной.

Оценка структуры и содержания работы

Диссертация Бессонова П.С. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава содержит аналитический обзор современных методов анализа нагрузок и оценки усталостной долговечности. Проведен анализ существующих подходов к параметризации нагрузок, оценке повреждающего воздействия и мониторингу нагруженности. На основе этого анализа сформулированы задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** разработан алгоритм оценки усталостной долговечности при спектральном представлении нагружения. Предложенный подход

интегрирует физические модели расчета усталостной долговечности, используемые в отечественной авиационной отрасли, со спектральным представлением нагрузок. Алгоритм верифицирован на экспериментальных и синтезированных данных.

Третья глава посвящена разработке алгоритма и программного обеспечения для определения усталостных характеристик трещиностойкости полимерно-композиционных материалов (ПКМ) по моде сдвига. Предложены методы обработки экспериментальных данных, устранения артефактов и автоматизации процесса оценки характеристик.

В четвертой главе разработаны нейросетевые алгоритмы для моделирования вертикальных усилий на опорах шасси транспортного самолета по данным штатного аварийного бортового регистратора. Исследованы различные архитектуры искусственных нейронных сетей, проведена оптимизация гиперпараметров и оценена точность прогнозирования нагрузок.

По своему содержанию и структуре диссертация является целостной работой. Поставленные задачи решены последовательно и в полном объеме. Диссертация изложена ясным и понятным языком, с корректным использованием специальной терминологии.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Степень обоснованности основных положений, выводов и рекомендаций соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Результаты работы подтверждены верификацией на экспериментальных данных, что свидетельствует о достаточной обоснованности полученных результатов.

Достоверность научных результатов и выводов диссертации подтверждена сравнением с экспериментальными данными, полученными в процессе усталостных испытаний и лётного эксперимента. Научная новизна работы заключается в разработке новых алгоритмов, направленных на

повышение точности оценки усталостной долговечности и эффективности мониторинга нагруженности авиационных конструкций.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов анализа нагружения и оценки усталостной долговечности. Практическая ценность состоит в создании алгоритмов и программного обеспечения, которые могут быть использованы для решения ключевых задач авиационной отрасли, таких как мониторинг нагруженности шасси, определение усталостных характеристик ПКМ и оценка долговечности конструкций.

Замечания по диссертационной работе

1. В обзоре литературы (раздел 1.4.1) отсутствует упоминание об одномерных сверточных нейронных сетях (1D CNN), которые также эффективно работают с временными последовательностями и могли бы расширить арсенал рассматриваемых методов.

2. В диссертации решаются три различные задачи (алгоритм оценки долговечности в частотной области, алгоритм определения усталостных характеристик ПКМ, нейросетевой алгоритм определения нагрузок). Однако связь между этими задачами раскрыта недостаточно четко. Например, оценка долговечности в частотной области разрабатывается для алюминиевых сплавов, в то время как определение усталостных характеристик проводится для ПКМ, что требует дополнительного обоснования.

3. В работе не указаны конкретные типы ПКМ, использованные в экспериментах: технология изготовления, количество слоев, тип материала. Также не раскрыто, как разработанный алгоритм определения усталостных характеристик ПКМ будет адаптироваться для разных типов ПКМ и технологий их производства.

Несмотря на указанные замечания, актуальность, достоверность и практическая значимость диссертационной работы не вызывают сомнений.

Соответствие автореферата основному содержанию диссертации

Автореферат полностью соответствует основному содержанию диссертации.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней»

Диссертация Бессонова Павла Сергеевича на соискание ученой степени кандидата технических наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена задача разработки алгоритмов анализа нагружения авиационных конструкций, имеющая существенное значение для авиационной отрасли. Работа соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор – Бессонов Павел Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

Официальный оппонент:

кандидат технических наук

Ерпалов Алексей Викторович,

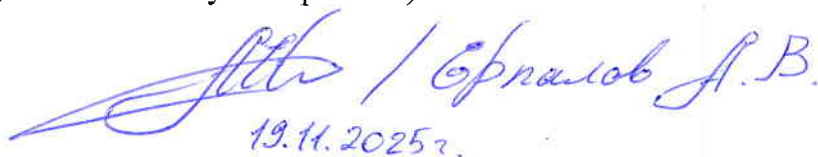
зам. директора Центра виброиспытаний и мониторинга состояния

конструкций НИИ опытного машиностроения Федерального

государственного автономного образовательного учреждения высшего

образования «Южно-Уральский государственный университет

(национальный исследовательский университет)»


19.11.2025 г.

Кандидатская диссертация защищена

по специальности 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Адрес места основной работы: 454080 Челябинск, проспект Ленина, 76.

Рабочий телефон: +7 (351) 267-99-00

Адрес эл. почты: erpalovav@susu.ru

