

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор
Федерального государственного
унитарного предприятия
«Центральный научно-
исследовательский институт
конструкционных материалов
«Прометей» имени И.В. Горынина
Национального исследовательского
центра «Курчатовский институт»,
Санкт-Петербург.
Д.т.н., профессор РАН



В.В. Антипов

«26» 08 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей») на диссертационную работу **Соболева Ильи Александровича** на тему «Разработка бортового комплекса мониторинга целостности конструкции авиационной и космической техники методом акустической эмиссии», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности:
1.3.7 – Акустика.

Актуальность темы диссертации

Разработка инновационных бортовых комплексов, обеспечивающих неразрушающий контроль (далее – НК) космических аппаратов, является актуальной проблемой. Сегодня можно выделить три основных вектора развития этой проблемы: стремление заменить ручной осмотр и снизить влияние человеческого фактора; применение искусственного интеллекта и нейросетей для обработки больших массивов данных; переход к непрерывному мониторингу. Работы по совершенствованию систем ведутся в соответствии с «Планом мероприятий по обеспечению качества и надежности изделий ракетно-космической техники ПАО «РКК «Энергия»

БГТУ «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова
Вх. № 81-26а-19
от 18.09.2026

и «Комплексной программой совершенствования системы менеджмента качества». Применяемые сегодня методы НК не обеспечивают полной надёжности так как пропускают скрытые дефекты в многослойных композитах, дают ложные срабатывания и зависят от геометрии изделия. Кроме того, контроль остаётся эпизодическим — непрерывного мониторинга нет, поэтому процессы деградации могут оставаться незамеченными.

В диссертации поставлены задачи исследовать закономерность изменения параметров акустической эмиссии (далее — АЭ) алюминиевых сплавов при циклическом и статическом нагружении образцов для выявления корреляции между стадиями развития дефектов, а также изменением характеристик АЭ-сигналов и для разработки алгоритма и методики локализации источников АЭ с количественной оценкой. В этой связи разработка теоретических основ, методики и алгоритма локации источников сигналов АЭ является актуальной научно-технической задачей, имеющей большое практическое значение.

Структура и содержание диссертации

Структура диссертационной работы обусловлена ее целью и задачами. Диссертация состоит из введения, основной части из четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Работа изложена на 160 страницах основного текста, содержит 77 рисунка, 15 таблиц и 115 наименований использованной литературы.

Во введении раскрыта актуальность исследования, поставлена цель и задачи работы, указаны новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, степень достоверности, апробация и внедрение полученных результатов.

В первой главе работы приведено описание объектов исследования, сформулированы проблема, состояние вопроса и обоснованы задачи исследования. В главе проанализированы особенности применения классических методов НК, применяемых для оценки эксплуатационных характеристик космической техники. Рассмотрены действующие требования, способы и методики их реализации, на базе чего выявлены ключевые

ограничения данных подходов. Установлено, что традиционные методы НК сопряжены с необходимостью вывода объекта из эксплуатации и его частичной либо полной разборки, они недостаточно эффективны, отдельно отмечена неспособность существующих решений надёжно фиксировать ударные воздействия в условиях открытого космоса с требуемой точностью локализации.

Значительное внимание уделено изучению возможностей АЭ как инструмента контроля целостности корпусных конструкций различного назначения. Проанализированы особенности использования приборов и информационно-измерительных систем НК на базе метода АЭ, детально рассмотрены алгоритмы и способы локации сигналов. В ходе исследования определены типовые закономерности формирования АЭ-сигналов в материале, а также предложены рациональные схемы размещения датчиков при проведении контроля.

Выполнен обзор широкого круга литературных источников по тематике НК. Его результаты показали, что существующие приборы характеризуются невысоким быстродействием обработки данных, невозможностью реализации контроля в режиме реального времени на всем жизненном цикле изделия, повышенной сложностью архитектуры, отсутствием модульной фильтрации по каналам и функционала дистанционной передачи сигнала от пьезоэлектрического преобразователя к вычислительному блоку. Дополнительным фактором, снижающим достоверность контроля, выступает искажение калибровочного сигнала — оно ухудшает точность расчёта скорости звука в объекте. На основании проведённого анализа сформулированы основные задачи предстоящего исследования.

Во второй главе работы выполнены исследования по установлению закономерностей изменения параметров АЭ в зависимости от трещинообразования при статической и циклической нагрузке. Эксперименты проводились с плоским образцом, изготовленным согласно ГОСТ 1497. В качестве материала выбран алюминиевый сплав АМг6. Автором было обследовано до 1000 образцов. Исследования подтвердили актуальность

темы диссертации. Выявлены зависимости между изменением механических свойств образцов и изменением параметров сигналов АЭ. Выполненный анализ позволил автору разработать математическую модель, позволяющую предсказывать разрушение образцов при одноосном растягивающем нагружении. Выявлены зависимости между изменением механических свойств образцов при циклических испытаниях и изменением АЭ сигналов. Сопоставление результатов с циклическими испытаниями подтвердило универсальность разработанных зависимостей. Автор обнаружил, что для эксплуатируемых конструкций критическое значение имеет скорость накопления кумулятивной энергии – превышение порога в $5 \cdot 10^8$ условных единиц за три последовательных цикла нагружения требует незамедлительного дополнительного диагностирования.

Полученные в главе результаты позволяют определить направление исследования и позволяют перейти к разработке алгоритма определения локализации дефектов. Результаты выполненных исследований имеют существенную практическую значимость.

В третьей главе работы выполнен анализ методов поиска минимума функции для нахождения положения источника сигнала АЭ на объекте за наименьшее количество итераций. Сопоставление методов показало наибольший потенциал метода Дэвидона – Флеттчера – Пауэлла поскольку при разработке алгоритма расчета минимума функции достигается наибольшая скорость сходимости при сохранении требуемой точности. Согласно разработанному алгоритму, расчет локации производится за четыре шага. В ходе первого шага вычисляется градиент минимизирующей функции. На втором шаге, с помощью одномерного поиска, вычисляется направление. На третьем шаге рассчитывается корректирующая матрица. На последнем шаге вычисляется минимум функции (при условии достижения минимума).

В четвертой главе работы на основе предложенного метода, алгоритма, математической модели выполнено экспериментальное исследование эффективности комплекса на производственной базе ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева». Проверка комплекса осуществлялась при

циклической нагрузке элементов корпуса космического аппарата, а также при имитации потери воздуха через корпус в условиях безвоздушного пространства. Представлены результаты испытаний, подтверждающие эффективность комплекса. В диссертации разработаны схемы установки и применения комплекса на элементах космических аппаратов, а также представлен алгоритм применения прибора. Методика проведения экспериментов, измерений и используемая аппаратура соответствует требованиям нормативной документации. На основе обработки экспериментальных данных получены важные научные и практические результаты. Установлены численные характеристики для предупреждения разрушения элементов конструкции корпуса космических аппаратов. Важнейшими характеристиками являются значение энергии и скорость накопления кумулятивной энергии. Апробация предложенного решения показала высокую эффективность комплекса при различных схемах нагружения с достаточной точностью, что свидетельствует о практической значимости исследования.

В заключении диссертации даны общие обоснованные выводы результатов работы и предложены рекомендации по их практическому применению. Выводы отражают полученные в работе результаты и соответствуют ее цели и задачам.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций работы

Научные положения, выводы и рекомендации, представленные в работе, обосновываются теоретическими исследованиями и большим объемом выполненных экспериментальных исследований. Предложенные методы и методики базируются на современных подходах технической акустики к расчетам локализации источников сигналов ЛЭ при изменении механических свойств исследуемого материала. Разработанная математическая модель, алгоритм и методика неразрушающего контроля, основанная на методе ЛЭ, корпусных элементов космических аппаратов не противоречат общим положениям теорий технической акустики, используемым при научных

исследованиях в России и зарубежных странах. Результаты исследований имеют апробацию на конференциях различного уровня и опубликованы в 15 научных работах, 5 из которых в изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ категории К2.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций работы

Достоверность подтверждена сравнительным анализом расчетных данных, полученных с использованием предложенных автором методов и методик, с данными экспериментов, выполненными на различных по своим характеристикам объектах исследования и образцов, а также успешную апробацию и внедрение полученных результатов исследований в систему мониторинга состояния Космического комплекса Российской орбитальной станции, при проектировании и разработке акустико-эмиссионной системы «РАНИС», при разработке внутреннего регламента Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.Ф. Менделеева» для проверки системы поиска дефектов в конструкциях вакуумных камер.

Научная новизна диссертационной работы

Новизна научных исследований заключается в совершенствовании системы мониторинга технического состояния материала корпусов и основных конструктивных модулей авиационных и космических аппаратов методом АЭ для предотвращения аварийных ситуаций, повышения безопасности эксплуатации, продления жизненного цикла. Новыми научными результатами являются:

- новые сведения о закономерностях изменения характеристик сигналов акустической эмиссии в процессе развития сквозных и ударных дефектов в алюминиевом сплаве АМг6 с разработкой математической модели, описывающей процесс разрушения материала образца;

- четырехшаговый алгоритм расчета локации дефекта, адаптированного к задачам мониторинга целостности конструкций космических аппаратов методом акустической эмиссии;

- методика и комплекс мониторинга корпуса космической станции неразрушающим методом АЭ включающие схемы расположения датчиков (особенности установки на поверхности объектов контроля) и алгоритм работы с прибором.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в:

1. Установлении корреляционных зависимостей между изменением параметров механических свойств алюминиевых сплавов и параметров сигналов АЭ, которые позволили прийти к созданию математической модели для прогнозирования разрушения материала, которая может углубить понимание механизма разрушения структуры материала под нагрузкой.
2. Определены информативные параметры АЭ контроля и закономерности их изменения в зависимости от типа дефекта (сквозного, ударного).
3. Экспериментально обоснован выбор математической модели Дэвидона – Флетчера – Пауэлла для решения задачи поиска локации источников сигналов акустической эмиссии, поскольку позволяет обеспечить наименьшую погрешность, наибольшую скорость сходимости, меньшее влияние шумов на результаты расчетов что расширяет методологическую базу расчётов локализации дефектов в условиях ограниченного времени и вычислительных ресурсов при условии обеспечения высокой точности локации источников.
4. Созданы методика и схемы неразрушающего контроля элементов конструкции элементов космических аппаратов, включающие: оптимальные схемы расстановки датчиков; алгоритм применения комплекса; критерии диагностики предельного состояния материала.
5. Теоретически обоснована и практически реализована методика обнаружения утечек воздуха в корпусных элементах конструкции космических аппаратов на производственной базе ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королёва» с использованием полученных результатов исследования, показавшая практические результаты.

6. Результаты экспериментальных исследований внедрены в акустико-эмиссионной системе «РАНИС», сертификационный номер № 78686-20 ООО «НДТ системы».

7. Результаты экспериментального исследования использованы при разработке системы мониторинга состояния ТЗ.0069.085 «Средства мониторинга технического состояния конструкции», шифр СЧ ОКР «КК РОС».

Замечания по содержанию диссертационной работы

1. В пункте «актуальность» используется выражение: специфика структуры алюминиевых сплавов. Следует уточнить какие именно особенности, с точки зрения АЭ, материала влияют на неэффективность применения классических методов неразрушающего контроля.

2. В работе описывается параметр «Ra-value». Следует дать расшифровку этого параметра.

3. При разработке математической модели на странице 73 указано, что уравнение получено на основе формулы Пирсона. Не приведены сведения как именно использовалась формула, что следует прокомментировать.

4. В главе 2 диссертации описываются образцы под номерами: 3, 4, 12, 13. Следует дать комментарий почему взят именно такой набор образцов. При обработке экспериментальных данных не приведены сведения о общем количестве испытанных образцов.

5. В диссертации выполнены исследования при испытаниях на одноосное растяжение плоских алюминиевых образцов. Получены математические модели, предсказывающие разрушение образцов, которые можно использовать для других изделий. Однако, для при изменении формы объекта нужны другие значения поправочных коэффициентов.

Указанные недостатки, являясь предметом для дискуссии, не снижают теоретической и практической значимости работы.

Заключение по результатам диссертации

Диссертационная работа Соболева Ильи Александровича «Разработка бортового комплекса мониторинга целостности конструкции авиационной

и космической техники методом акустической эмиссии» представляет собой законченное научное исследование, выполненное на высоком профессиональном уровне. В работе решена актуальная научная задача, обладающая теоретической новизной и практической ценностью. Диссертация обладает внутренним единством, написана технически грамотным языком, стиль изложения доказательный. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации, а публикации отражают ее основные положения. Научные положения, выводы и рекомендации, предложенные автором, обоснованы, достоверны и имеют важное значение для развития технических наук.

Положения диссертации соответствует пункту 2 паспорта научной специальности 1.3.7 «Акустика», отрасль науки – технические науки: «п.2. Акустическая диагностика и неразрушающий контроль в транспорте и строительстве; акустический мониторинг зданий и конструкций».

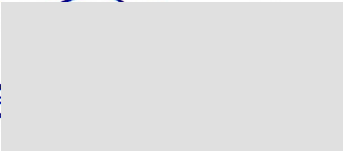
Автор демонстрирует глубокие знания в области акустики, владение современными методами теоретического и экспериментального исследования, умение получать и анализировать оригинальные результаты.

По форме и содержанию диссертация соответствует требованиям и критериям, установленным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 (ред. От 16.10.2024) «О порядке присуждения ученых степеней», для диссертаций, представленных на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор – Соболев Илья Александрович заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 1.3.7 – Акустика.

Отзыв подготовлен кандидатом технических наук Глибенко Олегом Валерьевичем.

Отзыв обсужден и утвержден на секции Научно-технического совета Научно-производственного экспериментального комплекса (далее – НПЭК) федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов

«Прометей» имени И.В. Горьнина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», протокол № 3 от 26 августа 2026 г.

Заместитель генерального директора по
научной работе – начальник НИОК  Глибенко О.В.
кандидат технических наук
специальность 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

Наименование организации:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горьнина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

(НИИ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей»).

Адрес: 191015, Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., д. 49

E-mail: mail@crism.ru

Тел.: +7 (812) 274-37-96