

«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор
БГТУ «ВОЕНМЕХ»

Д.Ф. Устинова



А.Е. Шашурин

15 октября 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский государственный технический университет ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова

Диссертация Разработка бортового комплекса мониторинга целостности конструкции авиационной и космической техники методом акустической эмиссии

Выполнена на кафедре «Технология патронного производства и обработка металлов давлением» (Е4) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова.

В период подготовки диссертации соискатель Соболев Илья Александрович в 2020 г. завершил обучение в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» по направлению подготовки 15.03.01 «Машиностроение» (бакалавр). В 2021 г. прошел повышение квалификации в Балтийском образовательном центре «Экобарьер» по дополнительной профессиональной программе «Акустическая безопасность в инженерной защите окружающей среды». В 2022 г. завершил обучение с отличием в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» по направлению подготовки магистратуры 15.03.03 «Прикладная механика». В 2025 году освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова по направлению подготовки 6.2.1 «Вооружение и военная техника» с получением свидетельства об окончании аспирантуры. Справка о сдаче кандидатских экзаменов, по специальности 1.3.7 – Акустика, выдана в 2025 г. Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. С 2023 года преподает на кафедре Е4 «Технология патронного производства и обработка металлов давлением» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова», в настоящее

время в должности ассистента кафедры. В декабре 2025 г. успешно освоил дополнительную профессиональную образовательную программу (252 ч.) в Балтийском государственном техническом университете «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова – «Акустические исследования и проектирование шумовиброзащитных мероприятий», решением итоговой аттестационной комиссии была присвоена квалификация «Инженер по охране окружающей среды (эколог)».

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Евгений Юрьевич Ремшев, работает доцентом кафедры «Технология патронного производства и обработка металлов давлением» (Е4) БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова.

По итогам обсуждения «Разработка бортового комплекса мониторинга целостности конструкции авиационной и космической техники методом акустической эмиссии».

принято следующее заключение:

1. Оценка выполненной соискателем работы

Автором предложены некоторые инновационные меры по изменению конструкции авиационных двигателей с целью повышения его акустической эффективности. Автором показана эффективность предложенных мер на примере полного избавления двигателей от одного из основных источников шума воздушных винтов, вихревого шума от торцевых вихревых жгутов лопасти.

Диссертация Соболева И.А. на соискание ученой степени кандидата технических наук соответствует требованиям, предъявляемым к научно-квалификационным работам. В диссертации на основании выполненных автором исследований решены задачи разработки методики, математической модели и алгоритма локации источника сигналов акустической эмиссии при мониторинге космической станции. Предложенная автором методика неразрушающего контроля до этого в анализе состояния космических систем практически не применялась и находила своё применение для совсем другого круга задач. Несмотря на это автором были выявлены общие закономерности процессов изменения параметров акустической эмиссии в процессе статического и циклического нагружения образцов и элементов Российской космической станции, с целью мониторинга целостности и нахождения локаций утечек воздуха на основе метода акустической эмиссии. Так же автором разработан алгоритм и математическая модель для анализа и идентификации сигналов акустической эмиссии методом Дэвидона - Флетчера - Пауэлла для оценки трещинообразования на ранних этапах. Автором разработан бортовой комплекс постоянного мониторинга целостности конструкции космической станции на основе метода акустической эмиссии для определения возможных ударных (внешних) воздействий с погрешностью локализации не более 10 % и определение утечки воздуха через дефект (трещину) в корпусе более 0,1 кг/сут с погрешностью определения местоположения не более 15 % от максимального расстояния между двумя ближайшими к месту утечки датчиками. Получены экспериментальные данные на элементах космической станции «РОС» с разработанным программно-аппаратным комплексом. На основании результатов разработаны рекомендации по применению инновационного программно-аппаратного комплекса и алгоритма для анализа целостности элементов космической станции «РОС» и определении локации дефектов. Автором показана эффективность предложенных мер в ходе экспериментальной апробации на базе ПАО РКК «Энергия» им. С. П. Королева.

2. Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации

Личное участие Соболева И.А. в получении результатов, изложенных в диссертации, состоит: в развитии подходов изучения накопления повреждений и анализа условий разрушения материалов и конструкций из алюминиевых сплавов с использованием метода акустической эмиссии; выявлении общих закономерностей процессов дефектообразования и потери воздуха через дефекты; формировании теоретических предпосылок для разработки инновационных принципов проектирования бортовых комплексов мониторинга целостности конструкции космических аппаратов различного назначения; построении математической модели локализации дефектов; установлении закономерностей генерации сигналов акустической эмиссии в алюминиевых сплавах при различных механизмах нагружения; в разработке рекомендаций по определению локации дефекта; в апробации результатов; подготовке публикаций по выполненной работе; выступлениях на конференциях и семинарах. Полученные результаты экспериментального исследования использованы при разработке системы мониторинга ТЗ.0069.085 «Средства мониторинга технического состояния конструкции» Шифр СЧ ОКР «КК РОС», государственный контракт № 2432730300620020160055351/351-РС403/24/62 от 02.07.2024 на тему «Создание космического комплекса российской орбитальной станции».

Диссертационная работа является законченным исследованием, лично выполненным Соболевым И.А.

3. Актуальность темы диссертации определяется следующими факторами:

- возникающие и развивающиеся микродефекты, а также утечки воздуха через них являются одними из наиболее распространенных факторов нарушения работоспособности элементов космических аппаратов, но классические методы неразрушающего контроля не позволяют в режиме реального времени во время эксплуатации проводить анализ элементов конструкции космических изделий, что приводит к массе негативных последствий;

- вопрос разработки и внедрения программно-аппаратного комплекса постоянного мониторинга, основанного на методе акустической эмиссии, для анализа элементов космической станции «РОС», остается практически неизученным;

- отсутствие установленных закономерностей изменения параметров акустической эмиссии при статическом и циклическом нагружении в зависимости от наличия дефектов в материале образцов;

- отсутствие расчетных схем, алгоритмов, методик, математических моделей для регистрации, обработки, анализа и идентификации сигналов акустической эмиссии с целью оценки герметичности, трещинообразования и предрасположенности к развитию дефектов корпусных элементов космической станции на этапе активной эксплуатации в процессе всего жизненного цикла;

4. Научная новизна:

- выявлены закономерности регистрации импульсов с максимальными амплитудами в материале образца в процессе начала движений дислокаций и при достижении физического предела текучести, установлена корреляционная зависимость между параметрами Ra-value и

амплитудой импульсов, разработана математическая модель на основе формулы Пирсона, описывающая процесс разрушения материала образца, установлены предельные коэффициенты эксплуатационной прочности для образцов без трещины и с трещиной (0,78 и 0,85 соответственно) при статическом растяжении.

- впервые реализован алгоритм локации сигнала акустической эмиссии на основе предложенной математической модели Дэвидона – Флетчера – Пауэлла для поиска утечки воздуха в конструкции космической станции.

- разработана концепция бортового комплекса постоянного мониторинга целостности конструкции космической станции на основе метода АЭ для определения возможных ударных (внешних) воздействий с погрешностью локализации не более 10% и для определения утечки воздуха через дефект (трещину) в корпусе более 0,1 кг/сут с погрешностью определения местоположения не более 15% от максимального расстояния между двумя ближайшими к месту утечки датчиками.

5. Практическая значимость:

1. Исследованы характеристики параметров АЭ и разработаны подходы к изучению накопления повреждений и анализа условий разрушения материалов и конструкций из алюминиевых сплавов с использованием метода АЭ.

2. Разработаны теоретические предпосылки для инновационных принципов проектирования бортовых комплексов мониторинга целостности конструкции космических аппаратов различного назначения.

3. Разработана математическая модель локализации дефектов.

4. Разработана конструкция программно-аппаратного комплекса постоянного мониторинга целостности конструкции космической станции на основе метода АЭ для определения возможных ударных (внешних) воздействий с погрешностью локализации не более 10 % и определение утечки воздуха через дефект (трещину) в корпусе.

5. Разработана методика и схемы неразрушающего контроля элементов конструкции космической станции РОС.

6. Полученные результаты экспериментального исследования использованы при разработке системы мониторинга ТЗ.0069.085 «Средства мониторинга технического состояния конструкции» Шифр СЧ ОКР «КК РОС», государственный контракт № 2432730300620020160055351/351-РС403/24/62 от 02.07.2024 на тему «Создание космического комплекса российской орбитальной станции».

6. Научный подход к решению поставленных задач и степень достоверности и результатов, проведенных исследований

В предложенной математической модели задача поиска положения (локации) источника сигнала АЭ по результату измерения сигналов несколькими датчиками математически сводится к поиску минимума некоторой функции нескольких переменных. В простейшем случае для объемного элемента конструкции задачу поиска положения источника АЭ по времени приема сигнала разнесенными в пространстве датчиками можно математически сформулировать. Имеется несколько датчиков, координаты которых известны. Будем считать, что датчики упорядочены по времени прихода сигнала, то есть сигнал сначала приходит на первый датчик, затем — на второй датчик и т. д. Известны

разности времен приходов сигналов на датчики. Источник сигнала имеет (неизвестные) координаты. Допущениями в данной задаче будут являться: скорость распространения с сигналов АЭ в материале считается известной и постоянной во всех направлениях (то есть, материал считается изотропным с точки зрения распространения сигналов АЭ); сигнал распространяется от источника к датчику по прямой линии; источник сигнала АЭ является точечным. Поскольку выше указанные допущения выполняются не идеально, то для точного определения положения источника в пространстве рекомендуется или просто брать первые четыре — те, куда сигнал пришел раньше, или набирать все возможные группы по 4 датчика, решать задачу точно для каждой группы, а потом принимать за положение источника среднее арифметическое всех положений, полученных для групп. Другим подходом является подбор методом наименьших квадратов такого положения источника, чтобы суммарное квадратичное время отклонения рассчитанных времен прихода сигнала на датчики от фактических времен было минимальным. Были проанализированы и сопоставлены методы поиска: одномерный поиск локаций; метод сопряженных направлений; метод сопряженных направлений Пауэлла; метод Ньютона; метод Дэвидона – Флетчера – Пауэлла. Анализ показал, что метод Дэвидона – Флетчера – Пауэлла обладает наибольшим потенциалом для вычисления локации источников сигналов АЭ и на его основе была разработана математическая модель и алгоритм действий по расчёту локации, состоящая из четырех шагов.

Корректность принятых допущений и теоретических моделей подтверждена серией экспериментов, выполненных на базе ПАО «РКК «ЭНЕРГИЯ» им. С.П. Королева. Достоверность экспериментальных результатов подтверждается успешно принятым экспертами компании протоколом испытаний, а также использованием в ходе натурных испытаний современных методик при обработке информации, включающих методы оценки результатов и погрешности измерений. Достоверность результатов подтверждена в ходе натурных исследований, выполненных при использовании физически обоснованных подходов, методов и протоколов в качестве основных инструментов теоретического исследования, проведением экспериментальных исследований по научно обоснованным методикам, с использованием оборудования, измерительных приборов и аппаратуры, прошедших метрологическую аттестацию в сертифицированных учреждениях, совпадением результатов с надежными результатами других исследований при сопоставимых условиях.

7. Апробация и ценность научных работ соискателя, полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 15 научных работах, в том числе 2 в международной наукометрической базе Web of Science и SCOPUS, 5 работ в рецензируемых журналах, входящих в Перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК Минобрнауки РФ. Печатные работы с достаточной полнотой отображают содержание диссертации.

Основные положения диссертационной работы докладывались на отечественных и зарубежных конференциях и отраслевых конкурсах: Диплом победителя Конкурса лучших инновационных проектов в сфере науки и высшего образования Санкт-Петербурга в 2021 году в номинации «Лучшая инновационная идея» за проект «Разработка бортового комплекса, осуществляющего неразрушающий контроль конструкций летательных аппаратов в режиме реального времени при эксплуатации методом акустической эмиссии»

(ИП № 09/21); Победа во всероссийском молодежном научно-инновационном конкурсе «УМНИК» в 2021 г. от Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере с привлечением финансирования НИР по теме «Разработка бортового комплекса, осуществляющего неразрушающий контроль конструкций летательных аппаратов в режиме реального времени при эксплуатации методом акустической» на сумму в 500 тыс. руб. (Договор № 17838ГУ/2022 от 16.05.2023); Победа во всероссийском молодежном научно-инновационном конкурсе «Студенческий стартап» в 2023 г. от Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере с привлечением финансирования НИР по теме «Разработка бортового комплекса, осуществляющего неразрушающий контроль конструкций летательных аппаратов в режиме реального времени при эксплуатации методом акустической эмиссии» на сумму в 1 млн. руб. (Договор № 2443ГССС15-L/89986 от 08.12.2023); Победа в XVI Всероссийский межотраслевой молодежный конкурс-научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (Протокол № 3 от 22 ноября 2024 г.); Победа в конкурсе грантов 2024 года для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга (Протокол № 1/24 от 01.07.2024 г.); III место в номинации «Ракетные и космические системы» в Всероссийском межотраслевом молодежном конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (Москва, 2024 г.); Победитель XXI Всероссийского конкурса молодежных авторских проектов и проектов в сфере образования, направленных на социально-экономическое развитие российских территорий, «Моя страна – моя Россия»; XXVI всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы защиты и безопасности» (Санкт-Петербург, 3-6 апреля 2023 года; конкурс грантов 2023 года для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга (Санкт-Петербург, 20 марта – 18 апреля 2023 г.); X Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Защита от шума и вибрации» 1-2 октября 2025 г.).

Результаты диссертационной работы прошли испытания и были внедрены, что подтверждено техническим актом внедрения ООО «НДТ системы» и актом внедрения Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева». Отдельные результаты диссертационной работы внедрены и используются в учебно-методических материалах курсов лекций, лабораторных работ и практических занятий ФГБОУ ВО «БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова».

8. Специальность, которой соответствует диссертация

Диссертационная работа соответствует специальности 1.3.7 «Акустика».

Диссертация «Разработка бортового комплекса мониторинга целостности конструкции авиационной и космической техники методом акустической эмиссии» Соболева Ильи Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.7- «Акустика».

Заключение принято на общем заседании кафедры «Техносферная безопасность и вычислительная механика» (Е5) и «Технология патронного производства и обработка

металлов давлением» (Е4) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова.

Присутствовало на заседании 37 человек. Результаты голосования: «за» - 37 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол 04 от 19.12.2025 г.

Доктор технических наук, доцент кафедры Е4 «Технология патронного производства и обработка металлов давлением» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова



Ремшев Евгений
Юрьевич

Кандидат технических наук, и.о. заведующего кафедрой Е5 «Техносферная безопасность и вычислительная механика» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова



Олейников Алексей
Юрьевич

Доктор технических наук, профессор кафедры Е5 «Техносферная безопасность и вычислительная механика» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова



Куклин Денис
Александрович