

УДК 620.179.17.

*На правах рукописи*



**Растегаев Игорь Анатольевич**

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ШУМОПОДОБНЫХ  
СИГНАЛОВ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ  
ТРИБОЛОГИЧЕСКОЙ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ НА  
ОСНОВЕ ИЕРАРХИЧЕСКОГО БЕСПОРОГОВОГО СПЕКТРАЛЬНО-  
ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА**

Специальность 2.2.8. – Методы и приборы контроля и диагностики материалов,  
изделий, веществ и природной среды

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Тольятти – 2022

Работа выполнена в НИО-2 «Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы» Научно-исследовательского института прогрессивных технологий (НИИПТ) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ»).

Научный консультант:

**Мерсон Дмитрий Львович** доктор физико-математических наук, профессор, директор НИИПТ ФГБОУ ВО «ТГУ»

Официальные оппоненты:

**Иванов Валерий Иванович** доктор технических наук, профессор, ЗАО «Научно-исследовательский институт интроскопии МНПО «Спектр», главный научный сотрудник.

**Барат Вера Александровна** доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», доцент кафедры диагностических информационных технологий.

**Бобров Алексей Леонидович** доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Физические методы контроля качества».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет».

Защита состоится 27 января 2023 г. в 14.00 часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.0.077.02 на базе ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» и ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» по адресу: 426067, г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» и на сайте: <http://udman.ru/ru/scientific-activity/dissertation-council/>

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 426067, г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета 99.0.077.02,  
доктор технических наук, доцент

 Махнева Татьяна Михайловна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время к числу общемировых трендов относится развитие системы анализа рисков безопасной эксплуатации опасных производственных объектов (под которыми понимаются технические устройства или оборудование, предназначенное для выполнения технологического процесса в химической, нефтехимической или нефтеперерабатывающей промышленности) по данным неразрушающего контроля, в которой особые надежды связывают с методом акустической эмиссии (АЭ). Последнее объясняется высокой чувствительностью метода к процессам дефектообразования и его принципиальной способностью обеспечить непрерывный контроль опасных, недоступных или протяженных промышленных объектов, т.е. оценивать техническое состояние опасных производственных объектов непосредственно во время эксплуатации (мониторинг). Высокая ответственность, возлагаемая на метод АЭ, подразумевает повышенные требования к качеству получаемых с его помощью результатов и выводов. При этом к числу неблагоприятных факторов, оказывающих наиболее негативное влияние на результат применения метода, следует отнести шумоподобные сигналы, которые сопровождают все режимы эксплуатации большинства промышленного оборудования, особенно динамически нагруженного, в связи с чем, шум является неотъемлемой частью любых диагностических сигналов АЭ. Высокий уровень шумов может приводить к сбою корректной работы детекторов сигналов АЭ, что сопровождается: пропусками регистрации сигналов; ошибками вычисления времени их прихода; появлением ложных или смещением реальных локационных событий; неправильной оценкой класса опасности акустических источников и в целом некорректной оценкой технического состояния опасных производственных объектов. Как следствие, контроль методом АЭ шумных объектов существующими на сегодня средствами метода или затруднен или даже вовсе не возможен, что сдерживает применение этого прогрессивного метода для диагностики опасных производственных объектов, особенно, если в их состав входят гидравлические, трибологические, электромагнитные и др. системы, устройства или агрегаты. Таким образом, проблема применения метода АЭ для оценки технического состояния опасных производственных объектов в условиях высокой зашумленности имеет важное, как научно-техническое, так и хозяйственное значение, решение которой позволяет внести значительный вклад в повышение промышленной безопасности эксплуатации таких объектов, а, следовательно, и в общее состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасных производственных объектов и их последствий. Тема диссертации полностью соответствуют критической технологии РФ «Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (Указ Президента РФ № 899 от 7 июля 2011 г.).

**Степень разработанности темы исследования.** Многими авторами показано, что добиться существенного прогресса в безопасности эксплуатации и снижении издержек на ремонт и обслуживание промышленного оборудования можно только на основе максимально раннего диагностирования их повреждений. Применительно к методу АЭ это означает необходимость обнаружения сигналов на уровне шумов и/или возможность распознавания сигналов от нескольких одновременно действующих акустических источников. Ранее работы, направленные на решение указанных задач, велись в двух основных направлениях: (1) фильтрация (шумоподавление) регистрируемых сигналов с целью приведения их к импульсному виду для оценки амплитудным пороговым методом и (2) анализ непрерывной АЭ. В первом направлении работали практически все основные школы метода АЭ. Однако при уровне сигнала, сопоставимым с шумом ( $SNR < 6$  дБ), его энергетический вклад настолько мал, что шумоподавление либо не возможно в принципе выполнить без потери сигнала, либо сигнал критически искажается. Поэтому параллельно силами научных школ, занимавшихся исследованием АЭ при: изнашивании материалов (Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого г. Гомель; МИФИ г. Москва; Томский политехнический университет совместно с Томским научным центром СО РАН и др.); истечении среды через несплошность (ВНИИФТРИ г. Хабаровск; Ижевский Государственный технический университет; Томский политехнический университет и др.); сварке (НПО «ЦНИИТМАШ» г. Москва; ФГУП СибНИА им. С.А. Чаплыгина совместно с Сибирским государственным университетом путей сообщения г. Новосибирск; Крыловский государственный научный центр г. Санкт-Петербург и др.); кристаллизации веществ (Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону и др.) и коррозии материалов (ОАО «Оргэнергонефть» г. Самара; НПО «ВНИКТИ нефтехимоборудование» г. Волгоград; ООО ИнтерЮнис-ИТ г. Москва и др.) развивался второй подход, основанный на статистическом анализе непрерывной АЭ. Последний сначала строился на отслеживании интегральных оценок таких, как: скорость счета, среднеквадратическое значение или огибающая потока сигналов. Позже с развитием аппаратных средств начали использоваться спектральные и корреляционные оценки. За рубежом основные работы, показывающие, что шумоподобная АЭ содержит в себе диагностическую информацию, необходимую для оценки технического состояния различных объектов контроля, проводились: Mba D., Boness R.J., McBride S.L., Mazal P., Nase A., Voinet M. и др. Резюмируя мировой опыт можно сделать вывод, что прогресс в извлечении «полезной» информации из шумоподобных сигналов следует ожидать при смещении акцента анализа характеристик АЭ от амплитудных к спектрально-статистическим. Однако на сегодня не предложено комплексное техническое решение, позволяющее: обнаружить шумоподобный акустический источник, установить его физическую природу, оценить его координаты и класс опасности. Следовательно, обнаружение диагностических признаков в шумоподобных сигналах является актуальной

научно-технической проблемой, решение которой открывает новые перспективы применения метода АЭ для: раннего выявления источников (дефектов), повышения достоверности контроля и расширения сфер применения (номенклатуры поддающегося контролю оборудования). Все отмеченное выше в совокупности способствует развитию и метода АЭ, как самостоятельного метода, и всей системы неразрушающего контроля в целом, что, несомненно, способствует снижению вероятности аварий на опасных производственных объектах и, соответственно, вносит значительный вклад в развитие промышленной безопасности страны.

**Основная идея работы** в отличие от традиционного подхода, основанного на анализе сигналов АЭ только выше заданного амплитудного уровня, заключается в непрерывной идентификации (поиске) критических точек смены доминирующих механизмов повреждения элементов оборудования, наступление которых по гипотезе работы является диагностическим признаком изменения технического состояния объекта контроля. При этом поиск диагностических признаков предлагается проводить путем отслеживания спектрально-временного подобия сигналов АЭ, которое, в свою очередь, основывается на следующих **положениях**: (i) при формировании одинаковых внешних или внутренних факторов действуют одинаковые акустические источники; (ii) единые по физической природе акустические источники и процессы генерируют сигналы АЭ со схожим спектральным составом; (iii) количество возможных одновременно действующих акустических источников ограничено и они развиваются стадийно и циклически (имеют закономерность); (iv) итоговое акустическое излучение в каждый момент времени отражает суперпозицию волн от всех источников, но основной вклад вносят доминирующие (основные) из них.

В качестве второй рабочей гипотезы принято, что акустические диагностические признаки у работающего оборудования могут проявляться на трех масштабных уровнях: 1-й составляет длительность действия элементарного импульсного источника АЭ (скачок трещины, искра, образование мартенситной иглы и т.д.), поэтому является уровнем анализа сигналов/событий; 2-й составляет длительность одного периода (цикла) работы оборудования (обороту вращения, возвратно-поступательному движению, набору-сбросу давления и т.д.), поэтому является уровнем технологического действия и 3-й составляет длительность заданной наработки оборудования (час, день, неделя и т.д.), поэтому является уровнем рабочего процесса.

Проверка состоятельности и работоспособности обозначенных гипотез требует: повышения точности установления принадлежности сигналов АЭ конкретным физическим процессам и явлениям, многократной перепроверки результатов обнаружения источников шумоподобной АЭ, а также повышения надежности средств регистрации сигналов АЭ в условиях вибрации и колебания температуры. На основании вышесказанного сформулирована цель работы.

**Целью исследования** является разработка методов и средств обнаружения шумоподобных сигналов источников акустической эмиссии трибологической и гидродинамической природы на основе иерархического беспорогового спектрально-временного анализа, позволяющих оценить класс опасности источников и обеспечивающих контролепригодность, безопасность и эффективность эксплуатации технических устройств опасных производственных объектов.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи исследования**:

1. Определить проблемы, ограничивающие применение метода АЭ для оценки по шумоподобным сигналам технического состояния объектов контроля, имеющих в своем составе циклически нагруженные узлы трения-скольжения или силовые элементы, или ротационные механические активаторы гидродинамических процессов.

2. Разработать иерархический беспороговый метод анализа спектрально-временного подобия шумоподобных сигналов на нескольких временных масштабах, позволяющий устранить или снизить ограничения на применение метода АЭ при действии источников трибологической и гидродинамической природы (типа).

3. Разработать алгоритмы обработки АЭ данных, позволяющие на практике реализовать иерархический беспороговый метод анализа шумоподобных сигналов и путем экспериментальных исследований выбрать оптимальный (эффективный) вариант их применения.

4. Разработать способы и получить необходимые исходные данные для апробации предлагаемого метода в направлении обнаружения и исследования основных источников шумоподобных сигналов трибологической и гидродинамической природы на нескольких временных масштабах.

5. На реальных практических задачах оценить эффективность применения предлагаемого метода по отношению к стандартному амплитудному пороговому методу анализа АЭ данных.

6. Разработать технические решения, позволяющие повысить надежность применения средств регистрации сигналов АЭ на промышленных объектах в условиях действия циклических, тепловых и вибрационных нагрузок.

**Объектом исследования** в работе являются шумоподобные сигналы акустической эмиссии, сопровождающие трибологические и гидродинамические процессы и явления.

**Предметом исследований** являются беспороговые способы регистрации и выявления трибологических и гидродинамических источников шумоподобной АЭ на основе спектрального и временного подобия их проявления на трёх временных масштабах.

**Научная новизна работы** состоит в том, что:

1. Впервые для контроля циклически нагруженных элементов динамического и статического промышленного оборудования теоретически обоснована и

экспериментально подтверждена возможность обнаружения источников АЭ на фоне шума за счет оценки подобия проявления их признаков на нескольких временных масштабах;

2. Впервые для принятия решений использован параллельный анализа АЭ на трех временных масштабах, продолжительность которых соответствует длительности: (1) сигнала (времени существования элементарного акта источника); (2) цикла нагружения (времени проявления источника за полный период изменения напряженно-деформированного состояния объекта контроля) и (3) заданной наработки оборудования (времени, соответствующего некоторому числу полных периодов нагружения объекта контроля, достаточного для достоверной оценки скорости развития источника), в пределах которой подтверждается акустический источник, выявленный на первых двух временных масштабах, и устанавливается его класс опасности для эксплуатации оборудования;

3. Впервые предложены методы имитации основных механизмов разрушения материала циклически нагруженных элементов в виде узлов трения-скольжения и силовых элементов статического и динамического промышленного оборудования, позволяющие на объекте контроля изучать сигналы АЭ и их трансформацию при одновременном действии нескольких механизмов разрушения материала и различных источников шума без критического повреждения промышленного оборудования;

4. Сформулирован новый научный подход выявления и изучения стадийности срабатывания акустических источников, сопровождающих схватывание и пластическое отеснение материала контактирующих элементов узлов трения-скольжения динамического промышленного оборудования на основе использования спектрального и временного подобия их проявления;

5. Впервые для выявления усталостных трещин и оценки поврежденности цапф опорных подшипниковых узлов использованы закономерности спектрального и временного подобия проявления сигналов АЭ за цикл нагружения;

6. Предложен новый способ обнаружения вихрей в рабочей камере роторной установки, работающей на режиме обеззараживания жидких водных растворов, на основе отслеживания спектрального подобия сигналов АЭ.

**Основная практическая значимость работы** заключается в следующем.

1. На основе предложенного трехуровневого спектрально-временного метода анализа шумоподобных сигналов АЭ разработаны: способ повышения точности локации шумоподобных источников АЭ (Патент № 2515423); способ диагностики динамического промышленного оборудования (Патент № 2684709); способ управления работой роторных перемешивающих устройств с обратной связью на основе метода АЭ; способ анализа и сопоставления хронологии разрушения узлов трения-скольжения; методика

оценки поврежденности цапф сушильных цилиндров картоноделательных машин (№ МАЭК-СЦКДМ-001-2019).

2. Для верификации результатов регистрации и анализа шумоподобной АЭ при производственных и лабораторных испытаниях статически нагруженного оборудования разработан стенд, реализующий предложенный метод имитации основных источников АЭ без повреждения объектов контроля (Патент № 2608969).

3. Разработана схема, позволяющая при выходе датчика АЭ из строя компенсировать потерю работоспособности антенной группы путём изменения режима работы дублирующих и резервирующих линий регистрации АЭ преобразователей, входящих в данную или смежную антенную группу (Патент № 2601270).

4. Для обеспечения возможности регистрации шумоподобной АЭ с промышленного оборудования в условиях вибрации, термоциклирования и высоких температур разработаны: преобразователь АЭ повышенной надежности (Патент № 2601270) и универсальный акустический волновод (Патент № 2665360).

При получении обозначенных научных и практических результатов в диссертационной работе использовалась следующая **методология**: цели и задачи исследований сформулированы на основе анализа собственного практического опыта промышленного применения метода АЭ, а также опыта нескольких экспертных диагностических организаций. Уровень решённости поставленных задач уточнялся на основе анализа российских и зарубежных литературных источников по основным научным (Scopus, Web of Science, Elsevier, Springer, eLIBRARY) и патентным (ФИПС, WIPO и Google Patents) базам. Для решения поставленных задач использовались следующие **методы исследования**. В акустических исследованиях применялись приемы теории сигналов по цифровой обработке и анализу временных рядов, а именно методы: частотно-временного преобразования; фильтрации; кластеризации и статистического анализа данных. Исходные данные для акустических исследований получали путем записи АЭ при проведении стандартных методов испытаний материалов на: прочность и плотность; одноосное растяжение; рост усталостной трещины; трение и износ, а также при кавитационном методе обработки жидких сред с параллельной высокоскоростной видеосъемкой. Помимо записи АЭ анализируемый массив данных включал и синхронно полученные оценочные параметры стандартных методов механических испытаний (записей измерения температуры, нагрузки, длины трещины, силы трения и др.), а также результаты оценки повреждений посредством конфокальной лазерной сканирующей микроскопии. Исследование характеристик разработанных устройств регистрации АЭ проводились электрическими и акустическими методами на специализированных стендах. При анализе полученных расчетных и экспериментальных результатов использованы методы статистической обработки и теории погрешности.



**Достоверность полученных в работе результатов** обеспечивалась: (i) использованием поверенной испытательной аппаратуры и оборудования лабораторий аккредитованных в двух системах: International Laboratory Accreditation Cooperation (ИЛАС) и/или Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору (Росгортехнадзор); (ii) корректностью приближений, сделанных при имитации исследуемых источников АЭ; (iii) использованием кода проверенных модулей цифровой обработки данных реализованных в математических пакетах MathLab, Octave и Python; (iv) поэтапной верификацией результатов акустических исследований с контрольными параметрами стандартных методов механических испытаний (температурой, нагрузкой, длиной трещины, силой трения и др.), а также визуальным подтверждением с использованием средств микроскопии, видеозаписи и тепловых измерений; (v) значительным объемом проанализированных экспериментальных данных; (vi) согласием полученных результатов между собой и известными данными, полученными другими исследователями.

По результатам работы **на защиту выносятся следующие положения:**

1. Иерархический беспороговый спектрально-временной метод анализа сигналов АЭ за счет обработки диагностических данных на трех временных масштабах длительностью: акустического сигнала, цикла нагружения и заданной наработки оборудования обеспечивает более высокую вероятность обнаружения шумоподобных акустических источников по сравнению с амплитудным пороговым методом (соответствует п. 1 паспорта специальности).

2. Методы определительных испытаний для получения опорных АЭ признаков основных видов повреждений статического и динамического промышленного оборудования, имеющего в своем составе циклически нагруженные узлы трения-скольжения, силовые элементы или ротационные механические активаторы гидродинамических процессов позволяют осуществлять одновременную имитацию нескольких акустических источников и связать параметры сигналов АЭ с размером источника инициирующего их (соответствует п. 3 паспорта специальности).

3. Автоматизированное алгоритмическое и программно-техническое решение для иерархический беспороговой обработки сигналов АЭ, сопровождающей трибологические и гидродинамические источники основного типа по сравнению с амплитудным пороговым методом позволяет увеличить: вероятность обнаружения схватывания в 3 раза (на 49%) при сохранении на том же уровне вероятности обнаружения задира; вероятность локализации течи жидкой среды в 6,1 раз или на 33,6 % при 7-кратно меньших затратах и вероятность поддержания эффективного режима обеззараживания смазочно-охлаждающих жидкостей минимум в 1,15 раз или на 12,9% (соответствует п. 6 паспорта специальности).

4. Методика автоматизированного ранжирования циклически нагруженных элементов по степени их поврежденности усталостными трещинами, основанная на отслеживании подобию проявления диагностических АЭ признаков на трех временных масштабах по сравнению с ультразвуковым контролем обеспечивает достоверность обнаружения повреждения на уровне 73% при вероятности его пропуска 10% и перебраковки изделия 17% (соответствует п. 7 паспорта специальности).

5. Схема компенсации потери работоспособности антенной группы путём изменения режима работы дублирующих и резервирующих линий регистрации АЭ преобразователей, входящих в данную или смежную антенную группы позволяет обеспечить непрерывность контроля в диапазоне температур от минус 65 до плюс 65 °С в течении 10 лет с вероятностью на 37÷70 % выше схемы использующей стандартные преобразователи АЭ (соответствует п. 1 паспорта специальности).

Настоящая **работа выполнялась в рамках научных программ и проектов** НИИ «Прогрессивных технологий» Тольяттинского государственного университета (ТГУ) при реализации следующих научных тем: Мегагрант Правительства РФ по постановлению Правительства РФ № 220 от 09.04.2010г. (первая очередь). Проект № 11.G34.31.0031; Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы». Проект № RFMEFI58614X0011 (Соглашение № 14.586.21.0011 от 27.11.2014г.) и Проект № RFMEFI57714X0145 (Соглашение № 14.577.21.0145 от 28.11.2014г.); Государственное задание Минобрнауки РФ. Проект № 11.8236.2017/9.10 и Проект № FEMR-2020-0003; Российский научный фонд. Проект № 20-79-10262 (Соглашение № 20-79-10262 от 20.07.2020г.).

**Апробация работы** проведена путем обсуждения основных положений и результатов на: V и VI-й Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур (ПРОСТ)», (Москва, 2010 и 2012); VI Международной научной конференции «Прочность и разрушение материалов и конструкций» (Оренбург, 2010); 50 и 60 Международной научной конференции «Актуальные проблемы прочности» (Витебск, 2010 и 2018); IX Всероссийской научно-технической конференции «Приоритетные направления развития науки и технологий» (Тула, 2011); VI Всероссийской научной конференции «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений» (Тольятти, 2011); V и X Международной школе «Физическое материаловедение» (Тольятти, 2011 и 2021); IX Всероссийской школе-конференции молодых ученых «КоМУ-2011» (Ижевск, 2011); XII Международной конференции «Трибология и надёжность» (Санкт-Петербург, 2012); 12-th «International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing (ICNDT-2013)» (Portoroz, 2013); Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы трибологии технологических, энергетических и транспортных машин" (Самара, 2015); III

Международной научно-технической конференции "Динамика и виброакустика машин" (Самара, 2016); VIII Саратовском индустриальном форуме 20-й международной специализированной выставке «Нефть. Газ. Хим. 2016» (Саратов, 2016); XII Международной научно-технической конференции «Трибология - машиностроению (ТриБОМАШ-2018)» (Москва, 2018); VIII Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение: Наука и образование (ММЕSE)» (Санкт-Петербург, 2019); VII Международном промышленном форуме «Территория NDT. Неразрушающий контроль. Испытания. Диагностика» (Москва, 2020); Всероссийской конференции с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (АПМАЭ)» (Тольятти, 2018 и Санкт-Петербург, 2021).

**Полученные в диссертационной работы результаты внедрены** для решения следующих практических задач: локализации места течи рабочей среды из вертикальных резервуаров; определения режима обеззараживания смазочно-охлаждающих жидкостей при их обработке в роторном устройстве; ранжирования смазочных материалов при сравнительных трибологических испытаниях; ранжирования цапф сушильных цилиндров картоноделательных машин по степени их поврежденности; неразрушающего контроля промышленных объектов при температуре выше максимально допустимой для работы преобразователей АЭ. Разработанные технические решения имитации основных акустических источников реализованы в составе учебно-исследовательского стенда, который используется для обучения и повышения квалификации специалистов АЭ контроля. На основании разработанных аппаратных и алгоритмических решений изготовлен экспериментальный аппаратно-программный образец интеллектуальной АЭ системы мониторинга «ЭО ИСМ-АЭ» с преобразователями повышенной надежности (ПАЭПН), конструктивное решение которых удостоено III-го места на «Салоне инноваций и стартапов-2020» VII Международного промышленного форума «Территория NDT. Неразрушающий контроль. Испытания. Диагностика». Работоспособность результатов работы в указанных направлениях практического применения подтверждается приложенными актами внедрения.

Основное содержание диссертационной работы изложено в 48 публикациях, в том числе: 22 статьях (из которых 5 опубликованы в журналах входящих в перечень рецензируемых научных изданий рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ по специальности 2.2.8 и 12 в соответствующих профилю изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science и Scopus), одной монографии, 5 патентах на изобретения РФ и 20 тезисах докладов. Библиографические ссылки основных публикации по теме диссертационной работы представлены в конце автореферата, патенты перечислены в разделе «практическая значимость работы», а остальные в диссертационной работе.

В достигнутых результатах **личный вклад автора** состоит: в формулировании основных идей (концепции) работы и проблем, препятствующих их реализации; анализе литературных источников, постановке цели и задач работы, а также выборе объектов исследований; полном участии в планировании и проведении экспериментов и испытаний, а также обработке и анализе их результатов. Обработка экспериментальных данных проводилась автором с использованием программного кода (скриптов), разработанных сотрудниками ТГУ (г. Тольятти). Обобщение экспериментальных данных, формулирование основных выводов по каждому направлению исследований и их апробация на указанных выше конференциях проводилось автором совместно с научным консультантом.

**Соответствие диссертации паспорту специальности:** п.1. «Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды»; п.3. «Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды»; п.6. «Разработка математических моделей, алгоритмического и программно-технического обеспечения обработки результатов регистрации сигналов в приборах и средствах контроля и диагностики с целью автоматизации контроля и диагностики, подготовки их для внедрения в цифровые информационные технологии»; п.7. «Автоматизация технологий, приборов контроля и средств диагностирования, способствующая снижению трудоёмкости, увеличению оперативности и достоверности оценки эксплуатационного ресурса изделий, повышению уровня экологической безопасности окружающей среды».

**Объем и содержание диссертационной работы** составляет 328 страниц и содержит 75 рисунков, 36 таблиц и состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 261 наименований, исключая публикации автора и 8 приложений.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость работы и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ сегодняшнего уровня системы неразрушающего контроля и роль метода акустической эмиссии (АЭ) в ней. Обозначены проблемы применения метода АЭ при наличии шумов и помех, проанализированы основные источники шумоподобной (непрерывной) АЭ, а также продемонстрирован текущий мировой опыт их применения при оценке технического состояния промышленного оборудования, несущих конструкций и их элементов. Представлен обзор современной

приборной базы метода и проблем применения АЭ контроля на современном этапе его развития.

Показано, что метод АЭ обладая высокой чувствительностью к источникам АЭ различной физической природы (механической, аэро/гидродинамической, химической, электромагнитной, тепловой и др.) имеет высокий потенциал применения для мониторинга и контроля технического состояния и режима эксплуатации не только стандартного (сосуды, аппараты, трубопроводы, краны и др.), но и более широкого спектра промышленного оборудования (насосы, компрессоры, трансформаторы, электродвигатели, перемешивающие устройства и др.). Однако для достижения положительного результата требуются методы анализа шумоподобной АЭ. Данное требование определяется, как потребностью раннего обнаружения источника АЭ (когда амплитуда импульсного сигнала сопоставима с шумом), так и назревшей необходимостью разделения непрерывной АЭ по типу её источника. Таким образом, по результатам литературного обзора сделан вывод, что шумоподобная АЭ является самостоятельным объектом исследования, на базе анализа которой возможна выработка диагностических признаков технического состояния или режима работы объекта контроля. Однако данное направление сегодня не проработано, поэтому является предметом настоящего исследования.

Во **второй** главе представлено теоретическое обоснование и общее описание предложенного в работе беспорогового спектрально-временного метода обнаружения сигналов АЭ на уровне шума. В первом пункте главы проведен анализ вероятности обнаружения сигналов на уровне шума с применением стандартного порогового амплитудного метода. Для чего было сделано теоретическое допущение о нормальном законе распределения амплитуды в шуме и сигнале на уровне шума (т.к. основную его энергетическую долю составляет шум). Путём перехода к плотностям распределения вероятности шума и сигнала+шум при взаимном вычитании их площадей относительного заданного порога дискриминации ( $a_{th}$ ) получено следующее общее выражение для расчета вероятности обнаружения сигнала амплитудой ( $a_s$ ) на уровне шума амплитудой ( $a_n$ ):

$$P_{oc} = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)}, \quad (1)$$

где:  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – соответственно среднеквадратическое отклонение распределения в кадре записи АЭ амплитуд шума и сигнала+шум. Результаты аналитического исследования выражения (1) при двух критических граничных условиях ( $P_{oc1}$  при  $\sigma_{1(2)} = 0,34 \cdot a_{n(s)}$  и  $P_{oc2}$  при  $a_{th} = 0$ ) приведены на рисунке 1. Исследование показало, что при амплитуде сигнала ( $a_s$ ) сопоставимой с амплитудой шума ( $a_n$ ), вероятность обнаружения сигнала ( $P_{oc}$ ) максимальна при уровне порога дискриминации  $a_{th} > a_n + 6$  дБ. При меньших соотношениях  $a_{th}/a_n$  значение  $P_{oc}$  быстро уменьшается и достигает 50% уже при  $a_{th} = a_n +$

0,9 дБ. Таким образом, теоретически установлено, что при соотношении сигнал-шум менее 6 дБ безальтернативно требуется переход от порогового на беспороговый метод записи и обработки АЭ данных, который, в свою очередь, требует разработки нового метода выделения (обнаружения) сигналов в непрерывном потоке АЭ данных и идентификации по ним типа их источника.

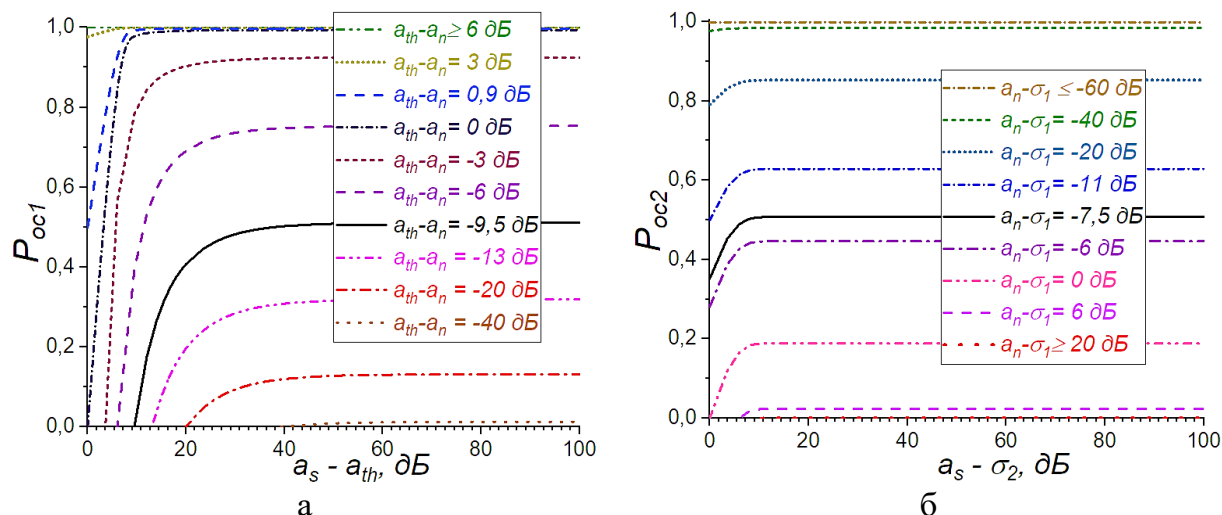


Рисунок 1 – Зависимости изменения  $P_{occ1}$  от  $a_s/a_{th}$  и  $a_n/a_{th}$  (а) и  $P_{occ2}$  от  $a_s/\sigma_2$  и  $a_n/\sigma_1$  (б)

Во втором пункте главы показано, что шумоподобные сигналы и сигналы на уровне шума целесообразно обнаруживать на основе анализа их спектрального и временного подобия на трёх временных масштабах (уровнях, 2-я гипотеза, стр. 5), что равносильно многократному неразрушающему контролю одного объекта. Известно, что в таком случае вероятность обнаружения дефектного состояния можно оценить, как:

$$P = 1 - (1 - P_I) \cdot (1 - P_{II}) \dots, \quad (2)$$

где:  $P_I, P_{II} \dots$  - вероятность обнаружения дефектного состояния соответственно на уровне анализа  $I, II \dots$ . Из (2) следует, что при любых не нулевых значениях  $P_I, P_{II} \dots$  итоговая вероятность  $P$  всегда будет выше, чем каждая из них по отдельности. Последнее являлось ключевым фактором, определившим выбор такого подхода для разработки беспорогового спектрально-временного метода обнаружения сигналов АЭ на уровне шума. Подробное обобщенное описание алгоритма предложенного метода приведено в третьем и четвертом пункте второй главы диссертационной работы, а представленный в работе на рисунках 2.7.1÷2.7.3 алгоритм показан в упрощенном виде на рисунке 2.

На рисунке 2 обозначено:  $a(t)$  – фрагмент беспороговой *stream*-записи АЭ, поступивший на анализ;  $a(t_I)$  и  $a(t_{II})$  – кадры записи выделенные из фрагмента  $a(t)$  для анализа соответственно на  $I$  и  $II$  уровне;  $D_S$  и  $D_C$  – заданная для анализа длительность сигнала и установленная по технологическим параметрам длительность цикла нагружения, соответственно;  $G^*(f)$  – нормированная спектральная плотность мощности (СПМ) кадра  $a(t_I)$ ;  $\bar{U}(t)$  – кривая изменения среднего значения оценочного параметра  $\bar{U}$  за цикл нагружения;  $N$  – количество источников АЭ, имеющих опорные данные для их

обнаружения;  $G_{oi}^*(f)$  и  $\bar{U}_{oi}(t)$  – опорные АЭ признаки  $i$ -х источников ( $i = 1 \dots N$ );  $[K_S]_I$  – коэффициент подобия (допуск), в пределах которых  $G^*(f)$  признаётся соответствующей  $G_{oi}^*(f)$ , а в пределах  $[K_S]_{II}$   $\bar{U}(t)$  соответствует  $\bar{U}_{oi}(t)$ ;  $i(t)$  – периодограммы проявления  $i$ -х источников АЭ на фрагменте записи  $a(t)$ , восстановленная по данным  $I$  и  $II$  уровня анализа;  $D_P$  – установленная по технологическим параметрам длительность выборки для анализа на  $III$  уровне периодограммы  $i(t)$ ;  $\Sigma G^*(f)/D_P$ ,  $\Sigma \bar{U}(t)/D_P$  и  $\eta$ ,  $\varepsilon$  – параметры оценки активности (частоты) проявления АЭ признака  $i$ -х источников по данным  $I$  и  $II$  уровня анализа и их предельные значения соответственно;  $\Delta t$  – шаг анализа фрагментов  $a(t)$  непрерывной беспороговой *stream*-записи АЭ.

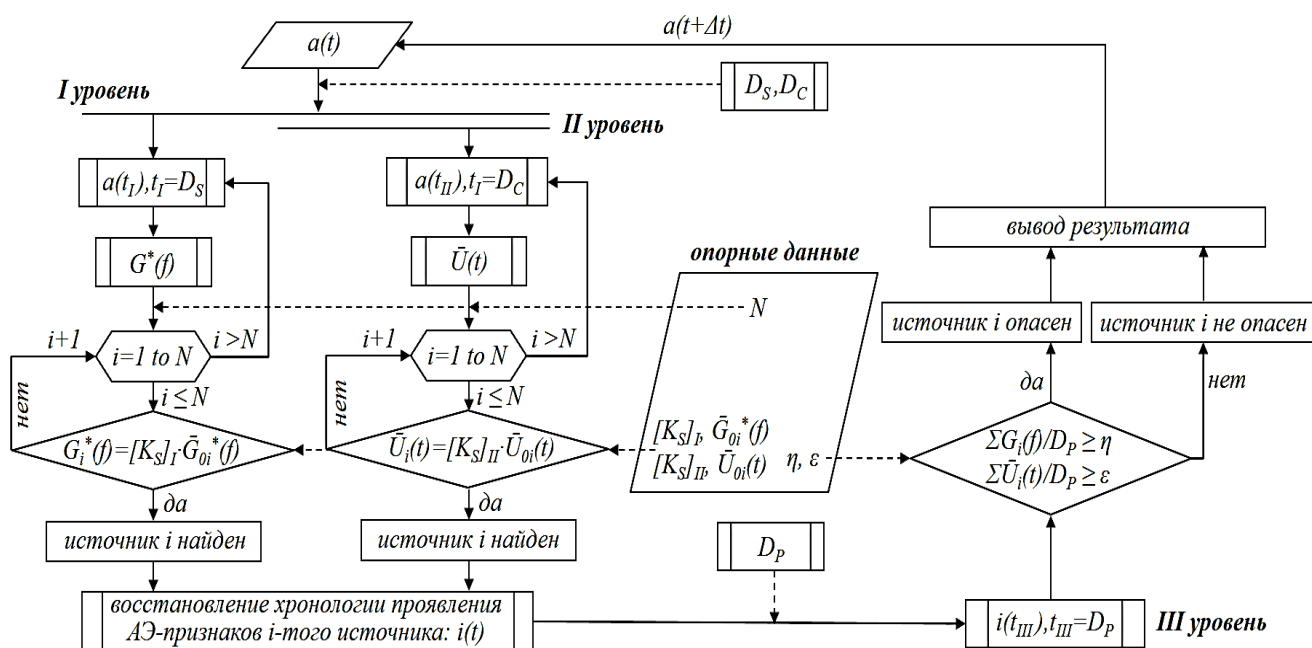


Рисунок 2 – Упрощенная схема реализации алгоритма беспорогового спектрально-временного метода обнаружения шумоподобной АЭ и сигналов АЭ на уровне шума, представленного в работе на рисунках 2.7.1÷2.7.3

Описание общей идеи, гипотез и основных положений предложенного метода было приведено ранее в пункте «Общая характеристика работы», поэтому здесь только выделим, что спектральное подобие АЭ оценивается по выражению:

$$G_i^*(f) = \pm K_S \cdot \bar{G}_{oi}^*(f) = [K_S] \cdot \bar{G}_{oi}^*(f), \quad (3)$$

а временное подобие по выражениям:

$$\bar{U}_i(t) = \pm K_S \cdot \bar{U}_{oi}(t) = [K_S] \cdot \bar{U}_{oi}(t), \quad (4)$$

$$\Sigma G^*(f)/D_P = \eta, \quad (5) \quad \text{и} \quad \Sigma \bar{U}(t)/D_P = \varepsilon, \quad (6)$$

Также, во втором пункте главы теоретически показано, что выражения (3)-(6) справедливы при соблюдении следующих условий: использование широкополосной записи АЭ; неизменное положение преобразователя АЭ относительно источника; передача сигнала от источника АЭ до преобразователя через твердое тело (акустический канал), не подвергаемое критическому внешнему воздействию; использование АЭ аппаратуры одного типа (вида) на протяжении всего времени контроля и обязательное

наличие опорных данных в виде:  $N$ ,  $G_{oi}^*(f)$ ,  $\bar{U}_{oi}(t)$ ,  $\eta$ ,  $\varepsilon$ . Ключевая роль опорных данных в предлагаемом методе выделена и на рисунке 2 поскольку от них зависит как принципиальная возможность его реализации, так и точность выявления требуемых источников АЭ и оценки их степени опасности. В связи с этим, в работе были разработаны два метода получения необходимых опорных данных, которые описаны в пятом пункте второй главы.

Первый метод получения опорных данных разработан для динамически нагруженного промышленного оборудования (ДО), второй – для нагруженного статически (СО). Алгоритмически оба метода повторяют схему, представленную на рисунке 2, но с некоторыми отличиями. Первое отличие состоит в том, что  $a(t)$  получают путем специальной имитации требуемых для выявления АЭ источников, т.о. точно известно в какой момент времени и какой источник работал. Второе отличие состоит в том, что данные  $N$ ,  $G_{oi}^*(f)$ ,  $\bar{U}_{oi}(t)$ ,  $\eta$ ,  $\varepsilon$  являются не входными, а выходными.

Для точного понимания в какой момент времени какой источник действовал в методе получения опорных данных для ДО осуществляется изменение условий работы динамического оборудования (режима смазывания, нагружения и т.д.) с установлением АЭ признаков (АЭ'). Затем проводится многократное повторение основного испытания каждого вида с его остановкой по АЭ непосредственно в момент наступления каждого АЭ признака, наблюдаемого в предыдущих испытаниях (АЭ = АЭ'). АЭ признаки сопровождающие повреждения являются критическими точками (КТ), требующими обнаружения. Предложенный подход остановки уточняющих испытаний по АЭ позволяет изучить масштаб повреждения и уточнить его механизм другими методами исследования, причём, не, как обычно, на момент окончания испытания, а непосредственно в момент КТ. В общем виде метод имитации и исследования КТ на ДО представлен на рисунке 3а, где:  $P_k$  – критическая нагрузка, неминуемо приводящая к выходу из строя узла ДО;  $P_k^{АЭ}$  – критическая нагрузка, установленная по АЭ данным;  $j$  – безразмерный коэффициент понижения испытательной нагрузки;  $T_{end}$  – длительность полного испытания оборудования.

В методе получения опорных данных для СО  $a(t)$  последовательно или параллельно генерируется активацией нескольких из десяти оригинальных имитаторов АЭ следующих основных повреждений: рисунок 3б – развитие трещины, спровоцированное механическим воздействием или коррозионной, или водородосодержащей средой; рисунок 3в – равномерное коррозионное повреждение или растворение агрессивной средой; коррозионное растрескивание под напряжением и водородное повреждение металла; протечка продукта через стенку (рисунок 3г) и фланцевое соединение (рисунок 3д); открывающийся свищ (рисунок 3г) и протечка продукта через вентиль (3е). При активации имитаторы АЭ разрушаются и, тем самым, достигается максимально подобная генерация АЭ исследуемого источника. Здесь оригинальным решением является



установка имитаторов на объект контроля через волноводы, поэтому разрушение любого из имитаторов не приводит к разрушению объекта контроля.

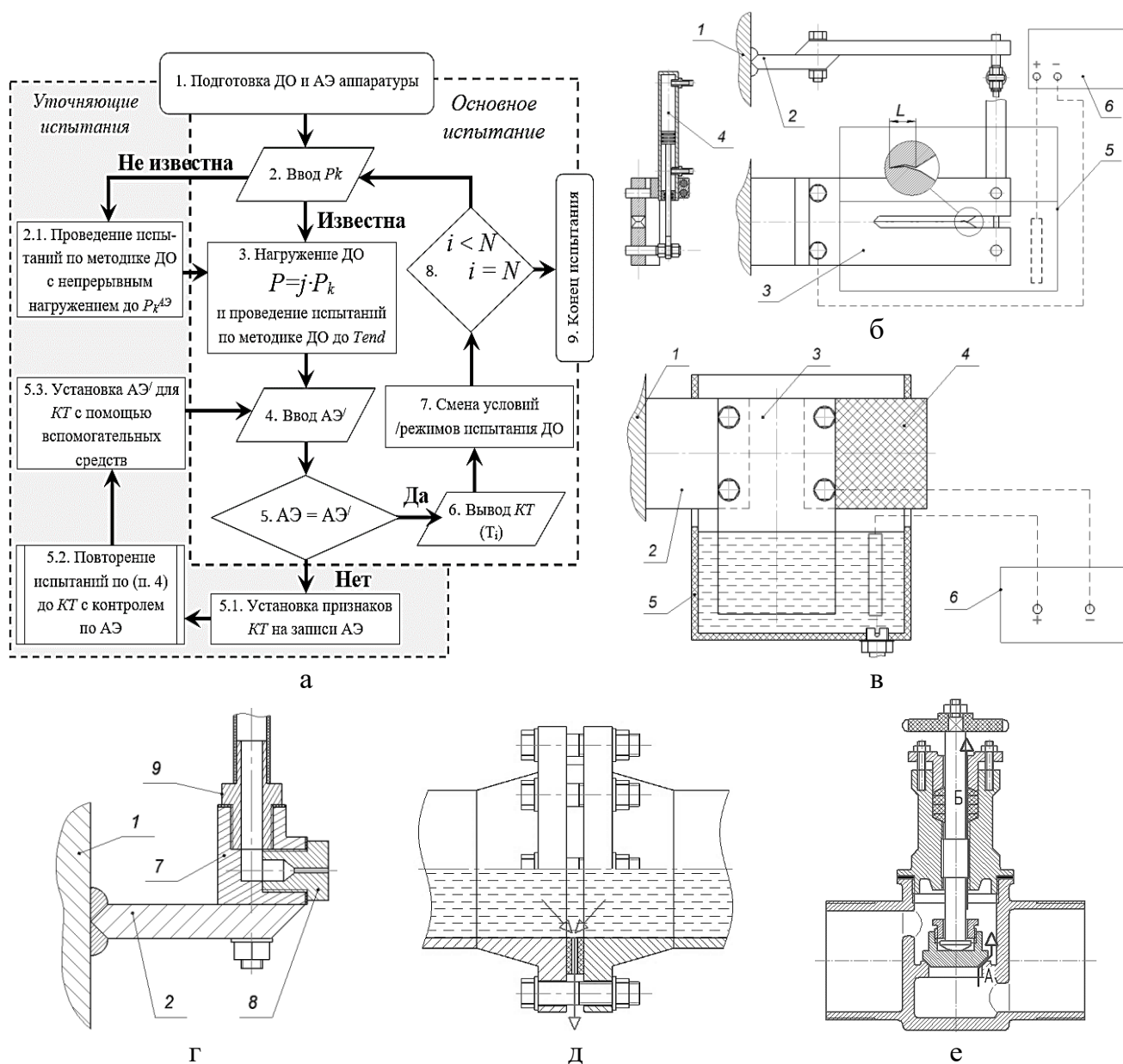


Рисунок 3 – К описанию методов имитации АЭ при получении пороговых данных для динамически (а) и статически (б-е) нагруженного оборудования

Таким образом, разработанные способы имитации АЭ на ДО и СО позволяют: (i) имитацию и выявление АЭ сигналов от нескольких одновременно действующих шумоподобных источников; (ii) воспроизведение АЭ, максимально приближенной к действию реальных источников, в том числе, непосредственно на промышленных объектах без опасности их критического разрушения или повреждения. На рисунках 3б-е обозначено: 1 – объект контроля; 2 – волноводы крепления имитаторов; 3 – разрушаемый при имитации АЭ образец материала; 4 – нагружающие или поддерживающие устройства; 5 – ванна с коррозионно-агрессивной средой; 6 – гальваническая система; 7 – корпус; 8 – жиклер; 9 – трубопровод подачи жидкой или газообразной среды.

В третьей главе описываются результаты теоретического анализа возможных вариантов реализации предложенного метода. Анализ заключался в выборе алгоритмов: частотно-временного преобразования (ЧВП); фильтрации и шумоподавления; локации; разделения АЭ на классы и оценки класса опасности АЭ источников, а также информативных параметров оценки сигналов АЭ шумоподобного вида.

В результате предварительного анализа для исследования целесообразности применения в предлагаемом методе отобраны: пять алгоритмов ЧВП (STFT – оконное преобразование Фурье, WT – вейвлет-преобразование, SPWD – псевдо-преобразование Вигнера, ChWD – преобразование Чои-Вильямса и ННТ – Гильберта-Хуанга); два алгоритма фильтрации (спектрального вычитания и частотной коррекции) и три алгоритма кластеризации, которые будут озвучены далее при описании четвертой главы. В данной главе ключевым моментом является то, что в связи с отсутствием в литературных источниках критериев оценки опасности источников непрерывной (шумоподобной) АЭ вообще и для II уровня анализа предлагаемого метода, в частности, были разработаны два критерия: кластерно-энергетический и частотно-энергетический. В основу критериев положен использованный в предложенном методе принцип спектрального и временного подобия АЭ. Поэтому в первом критерии классификация источников АЭ проводится в параметрах  $\Delta e / c_i$ , а во втором:  $k_E / k_f$ . Здесь  $\Delta e$  – показатель приращения энергии АЭ в цикле нагружения объекта контроля, определяемый как:

$$\Delta e = \frac{E_{C_i}}{E_{C_0}} - \frac{E_{C_{i-1}}}{E_{C_i}}, \quad (7)$$

В (7)  $\bar{E}_{C_0}$  – средняя энергия начальных рабочих циклов, выбранных для сравнения и которые либо не содержат развивающихся дефектов, либо они находятся на таком этапе развития, который не влияет на техническое состояние объекта контроля и не приводит к изменению АЭ;  $E_{C_i}$  и  $E_{C_{i-1}}$  – соответственно энергия АЭ в текущем и предыдущем рабочем цикле.

$c_i$  – кластер критического АЭ признака, устанавливаемый по подобию формы СПМ по алгоритму II уровня анализа, показанный на рисунке 2. Ключевым моментом здесь является то, что подбор критерия сравнения ( $K_s$ ) осуществляется таким образом, чтобы каждый кластер критического АЭ признака ( $c_i, i = 1, 2, 3, 4 \dots$ ) алгоритм переразбивал минимум на три подкластера, отражающих:  $c_{i1}$  – стадию отсутствия повреждения (отклонения технического состояния),  $c_{i2}$  – стадию зарождение повреждения и  $c_{i3}$  – стадию устойчивого (со стабильной скоростью) развития повреждения, но размером менее критического значения, когда его наличие еще не вызывает разрушение объекта контроля и позволяет разработать мероприятия по его безопасной эксплуатации или выводу из эксплуатации.

$k_E$  и  $k_f$  – энергетический и частотный коэффициенты, соответственно, показывающие приращение энергии ( $E$ ) и медианной частоты ( $f_m$ ) между начальным ( $E_{n0}$  и  $f_{m0}$ ) и последующим состоянием объекта контроля ( $E_n$  и  $f_{mn}$ ) по следующим формулам:

$$k_E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{E_{in}}{E_{in0}} \right), \quad (8) \quad k_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{f_{imn}}{f_{im0}} \right), \quad (9)$$

В (8) и (9)  $N$  – параметр усреднения (интервал расчета), который может составлять, как несколько кадров, так и несколько циклов.

Из описания критериев и формул (7) – (9) видно, что в первом критерии использована гипотеза подобия изменения АЭ за цикл нагружения, а во втором, гипотеза спектрального подобия проявления АЭ одних и тех же источников.

В **четвертой главе** описываются материалы, образцы, средства и методики исследования с помощью которых проводилась лабораторная и практическая апробация и оценка работоспособности, предложенного беспорогового метода анализа шумоподобной АЭ. Поэтому в первом пункте главы описываются способы получения модельных и реальных АЭ сигналов, сопровождающих трибологические и аэрогидродинамические процессы, рост и развитие усталостной трещины в вязком материале.

Модельные сигналы представляли собой три типа: первый – синтезированный Shirp-сигнал с синусоидами строго заданного частотного диапазона в конец которого интегрирована дельта-функция; второй – экспериментально полученный сигнал дискретной АЭ от источника Су Нельсона, разложенный в плоском акустическом канале на дисперсионные моды Лэмба ( $A_0$  и  $S_0$ ) и третий – экспериментально полученный сигнал непрерывной АЭ от истечения воздуха через калиброванное отверстие (жиклер  $\varnothing 0,75$  мм при перепаде давления 0,4 МПа). Модельные сигналы имели внутри частотно-временные трансформации с точно определенными метками (реперами) по времени и частоте, поэтому они в работе были использованы при сравнении и выборе ЧВП.

АЭ при трибологических источниках в виде отклонения от нормального режима изнашивания узлов трения-скольжения по механизмам схватывания, задира и сваривания контактных поверхностей имитировалась на стандартных схемах лабораторных испытаний: (а) четырехшариковой (ГОСТ 9490) на машине ЧМТ-1; (б) цилиндр-диск (ASTM G99) на трибометре Nanovea TRB-50N и (в) цилиндр-кольцо (ASTM G77) на машине УМИТИ-АвтоВАЗ. При имитациях АЭ источников использовались контактные материалы (перечисление по машинам трения): (а) ШХ-15/ШХ-15; (б) ШХ-15/Сталь 20, ШХ-15/Сталь 45 и ШХ-15/Р6М5; (в) 45Х22Н4М3/Чугун Gh190 и АМг3/Чугун Gh190 при следующих условиях смазывания: сухое трение, вода, ШРУС-4М, Renolit JP1619, Фиол-1, Литол-24, Unirex-3, Lukoil-Standard 10W-40. По данным АЭ источникам была собрана самая большая экспериментальная статистика, поэтому их сигналы были использованы

при сравнении и выборе варианта шумопонижения в АЭ сигналах в сочетании с методом их кластеризации. При получении опорных данных для подтверждения связи АЭ с обозначенными источниками применялись средства трибологических испытаний (запись силы трения, глубины износа), а также сканирующая оптическая (Zeiss Axiovert 40 MAT) и конфокальная лазерная (Olympus LEXT OLS4000) микроскопия.

АЭ источников, связанных с ростом и развитием дефекта промышленного оборудования в виде усталостной трещины в вязком материале (пластическая деформация, трещинообразование и трение берегов трещины) имитировалась в испытаниях на CTOD (Crack Tip Opening Displacement) по ASTM E647. При имитациях источников использовались стали: 09Г2С и 20Л. Данные источники рассматривались в рамках разработки способа и методики ранжирования материала циклически нагруженных элементов промышленного оборудования (будут описаны далее). Поэтому для верификации опорных АЭ данных использовались средства испытательной машины Instron 8802 (данные силы нагружения, длины трещины, коэффициента интенсивности напряжения и температуры образца), а также: тепловизор FLIR SC7700M; сканирующая оптическая и конфокальная лазерная микроскопия. При промышленной апробации разработанной методики факт обнаружения усталостных трещин АЭ методом подтверждали средствами ультразвуковой дефектоскопии (Томографик УД-4Т с пьезопреобразователем П111-2,5-К20).

АЭ от аэрогидродинамических источников имитировали разной скоростью движения жидкой среды (воды) в открытом канале и в замкнутом пространстве, что позволило получить капельный, турбулентный и турбулентный с вихреобразованием режимы истечения среды. Первый имитатор АЭ представлял собой процесс истечения рабочей среды через сквозную несплошность, которая задавалась жиклерами диаметрами 0,45; 0,75; 0,85; 0,95; 1,02; 1,35; 1,5 и 6,0 мм, а режим истечения среды – перепадом давления в 0,015; 0,03; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 и 0,8 МПа. Второй имитатор АЭ представлял собой режимы обработки жидких сред в роторных устройствах. Полученные при имитациях АЭ данные при промышленной апробации были использованы при разработке способа локализации течи испытательной среды из резервуара щелочи и способа поддержания режима обеззараживания смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) в роторно-пульсационном аппарате. Поэтому имитация АЭ выполнялась на специализированных стендах (будут описаны далее), которые для получения опорных данных и подтверждения связи АЭ с обозначенными источниками были оснащены: расходомером, манометрами, термопарами, а также средствами видеофиксации режима течения обычной (Sony HDR-CX 110E) и высокой (FASTCAM SA3 120K-M2) скорости съемки. При промышленной апробации разработанных способов соответственно применялось гидравлическое испытание по РУА-93 и стандартные биологические исследования СОЖ (ГОСТ 9.082, ГОСТ 9.085, МУК 4.2.1890, РД 52.24.495): наличие

грибов определялось на среде Чапека, концентрация бактерицидов – методом диффузии, количество аэробных гетеротрофных бактерий – на среде МПА, рН – потенциометрически.

Во втором пункте четвертой главы приведен состав средств и условия записи АЭ. В работе использовалось пять типов АЭ систем: РАС РСІ-2; ЭЯ-2; РАС Samos 24; A-Line 32D и ЭО ИСМ-АЭ. Первые четыре АЭ системы известны и все реализуют амплитудный пороговый и кадровый способы регистрации АЭ, поэтому использовались в работе для получения исходных данных и сравнения результатов их обработки с результатами, полученными на последней. ЭО ИСМ-АЭ – Экспериментальный Образец Интеллектуальной Системы Мониторинга АЭ, в которой программно был реализован предложенный в работе метод анализа шумоподобной АЭ на базе алгоритмов, отобранных в третьей главе. Поэтому в конце третьей главы приведено описание всех использованных в работе алгоритмов обработки и анализа АЭ, кроме ЧВП, которые использовались в немодифицированном виде и имеют подробное описание в доступных литературных источниках. Шумопонижение в кадрах записи АЭ проводилось с помощью двух известных алгоритмов: спектрального вычитания ( $F1$ ) и частотной коррекции ( $F2$ ), которые соответственно выполняются по правилам:

$$S_x(f) = \left[ |S_y(f)|^\beta - \alpha \cdot |S_n(f)|^\beta \right]^{1/\beta}, \quad (10)$$

$$S_x(f) = S_y(f) \cdot \alpha \cdot K_n(f), \quad (11)$$

где:  $S_y(f)$  и  $S_x(f)$  – исходный и отфильтрованный спектр АЭ сигнала;  $S_n(f)$  – спектр шума;  $K_n(f)$  – некоторая заданная функция коррекции спектра,  $\alpha$  и  $\beta$  – настроечные параметры, позволяющие задать оптимальные условия для шумопонижения. Отличительной особенностью применения в работе правил (10) и (11) являются способы получения функций  $S_n(f)$  и  $K_n(f)$ , что подробнее будет показано далее.

Подобие ( $K_s$ ) при сравнении АЭ данных определялось с помощью следующих алгоритмов кластеризации (классификации) данных: ( $K1$ ) – алгоритм кластеризации по подобию формы кривой СПМ на базе коэффициента достоверности аппроксимации или  $R$ -квадрат, который определяется как:

$$K_s = R^2 = 1 - \frac{\bar{S}_r^2}{\bar{S}_t^2} = \frac{\sum_1^n (G_o^*(f) - G_q^*(f))^2}{\sum_1^n G^*(f)^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_1^n G^*(f) \right)^2}, \quad (12)$$

где:  $G_o^*(f)$  и  $G_q^*(f)$  – соответственно функция нормированной СПМ, взятая за эталонную (опорная), и сравниваемая с ней;  $\bar{S}_r^2$  – остаточная дисперсия;  $\bar{S}_t^2$  – общая дисперсия;  $n$  – объем частотной выборки  $G_o^*(f)$  и  $G_q^*(f)$ ;

( $K2$ ) – метод  $k$ -средних:

$$V = \sum_{l=1}^k \sum_{x_m \in C_l} \|x_m - c_l\|^2, \quad (13)$$

где:  $k$  – количество априорно заданных кластеров;  $C_l$  – количество полученных кластеров ( $l = 1, 2, 3 \dots k$ );  $c_l$  – средний арифметический центроид всех точек кластера  $C_l$  (центр масс векторов);  $x_m$  – объект выборки в координатах  $m$  – признаков, выбранных для сравнения ( $m = 1, 2, 3 \dots \infty$ );  $Ks = \|x_m - c_l\|^2$  – мера сравнения, выбранная для оценки расстояния между объектом выборки  $x_m$  и соответствующим центроидом  $c_l$  в пространстве  $m$  – признаков.

(КЗ) – алгоритм классификации АЭ по скорости ( $\langle rms \rangle$ ) и дисперсии ( $\sigma_{rms}^2$ ) изменения среднеквадратичного значения (RMS), которые рассчитывались как:

$$\langle rms_q \rangle = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^Z (\hat{a}_{(q+j)rms} - \hat{a}_{(q+j-1)rms}), \quad (14)$$

$$\sigma_{rmsq}^2 = \frac{1}{Z-1} \left( \sum_{j=1}^Z \Delta \hat{a}_{(q+j)rms} - \langle rms_q \rangle \right)^2, \quad (15)$$

где:  $T$  – время осреднения для получения одной пары сравнения ( $\langle rms \rangle$ ,  $\sigma_{rms}^2$ );  $Z$  – количество последовательных отфильтрованных кадров записи АЭ  $\hat{a}(t)$ , используемых для осреднения;  $q$  – порядковый номер расчетного кадра. Здесь значение  $Ks$  определяется соответствием положения характеристического вектора  $r(\langle rms \rangle, \sigma_{rms}^2)$  заданным границам двухпараметрического пространства.

В завершении четвертой главы приведено описание модифицированных триангуляционного алгоритма локации источников шумоподобной АЭ и метода оценки вероятности обнаружения местоположения АЭ источника. Отличительной особенностью первого является процесс подготовки данных заключающийся в построении периодограмм по алгоритму I уровня анализа представленному на рисунке 2, с последующим определением разности времен прихода по времени начала кадров записи АЭ, отнесенных к источнику каждого вида. Отличительная особенность второго состоит в том, что вероятность обнаружения АЭ источника определяется как геометрическая вероятность перекрытия трех площадей: область дефекта, область контроля дополнительным методом и область локационного кластера.

В пятой главе приведены результаты исследования вариантов реализации предложенного метода анализа шумоподобной АЭ и сигналов на уровне шума с помощью алгоритмов отобранных в третьей главе, а именно: пяти алгоритмов частотно-временного преобразования (ЧВП); восемнадцати схем совмещения двух алгоритмов с пятью функциями шумопонижения с тремя алгоритмами кластеризации АЭ данных и два алгоритма оценки степени опасности АЭ источников.

Результаты исследования пяти алгоритмов ЧВП для выявления контрольных частотных и временных меток в модельных АЭ сигналах показали, что при достаточном запасе в соотношении [частота дискретизации / максимальная частота спектра]  $\geq 4$  Фурье преобразование позволяет получить частотно-временное разрешение на уровне других ЧВП. При этом выполняется меньшее количество подготовительной работы, направленной на установление оптимальных настроечных параметров. Важно, что для данного преобразования разработаны быстрые алгоритмы расчета и на выходе всегда гарантируется результат, хотя, возможно, и не самый лучший по сравнению с другими ЧВП, обеспечивающими локальный успех. Поэтому в настоящей работе на основании экспериментального сравнения ЧВП для апробации метода выбрано преобразование Фурье. При этом следует заметить, что предложенный метод не накладывает ограничений на вид используемого при анализе шумоподобной АЭ ЧВП, поэтому при необходимости повышения его чувствительности к источнику АЭ конкретного типа, может быть использовано частотно-временное преобразование другого вида.

Экспериментальное сравнительное исследование эффективности вариантов совмещения способов фильтрации и кластеризации АЭ данных заключалось в последовательном применении отобранных двух способов фильтрации ( $F1$  и  $F2$ ) и трех способов кластеризации ( $K1$ ,  $K2$  и  $K3$ ) к одному и тому же массиву АЭ данных, полученных при 132 трибологических испытаниях на четырехшариковой машине трения. Необходимые для реализации предлагаемого метода опорные данные получали по схеме, представленной на рисунке 3а, с подтверждением повреждений поверхностей трения средствами трибоиспытаний (по изменению силы трения) и средствами микроскопии. Следует особо выделить, что в настоящей работе  $F1$  и  $F2$  использовались не для полного подавления («глубокой» фильтрации) спектральных составляющих, а для шумопонижения («мягкой» фильтрации) с целью выравнивания (сделать равнозначными) изменения в СПМ кадров АЭ во всей рассматриваемой полосе частот. При этом из формул (10) и (11) видно, что результат шумопонижения определяется функциями  $S_n(f)$  и  $K_n(f)$ . Поэтому в рамках настоящей работы для  $F1$  и  $F2$  были специально разработаны процедуры получения трех типов  $S_n(f)$ -функций ( $f_I - f_{III}$ ) и двух типов  $K_n(f)$ -функций ( $f_{IV}$  и  $f_V$ ), которые представляют собой спектральные образы: общего шума рабочих технологических процессов, происходящих в объекте контроля –  $f_I$ ; шума нормального режима работы подвижных соединениях объекта контроля –  $f_{II}$ ; постоянной периодической помехи или шума, проявляющихся в какой-то части цикла работы какого-то узла или механизма объекта контроля –  $f_{III}$ ; собственных резонансов преобразователя АЭ –  $f_{IV}$  и образ не представляющих интерес высокоэнергетических источников шума на объекте контроля или акустически связанных с ним (внешние, наложенные) –  $f_V$ . Экспериментальное сравнение вариантов совмещения способов фильтрации и кластеризации данных проводилось по схеме, показанной на рисунке 4а, а критериями

оценки их эффективности являлись:  $P_{01}$  – вероятность обнаружения каждого из основных источников АЭ - формула (16);  $P_{02}$  – вероятность ошибки идентификации каждого из основных источников АЭ в пределах времени его действия - формула (17);  $b$  – количество дублирующих кластеров, которые по времени появления коррелируют с основными;  $N_b$  – количество нераспознанных кадров АЭ (либо не отнесенных ни к одному из кластеров, либо переразбитых кластеров) в процентах от общего количества кадров во всей выборке.

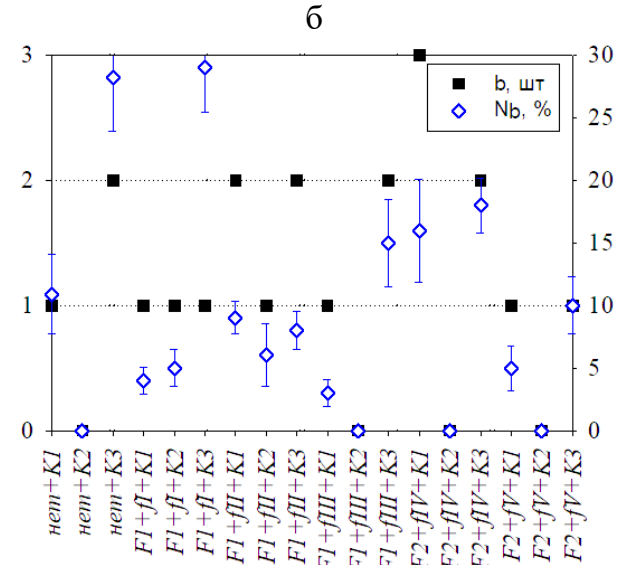
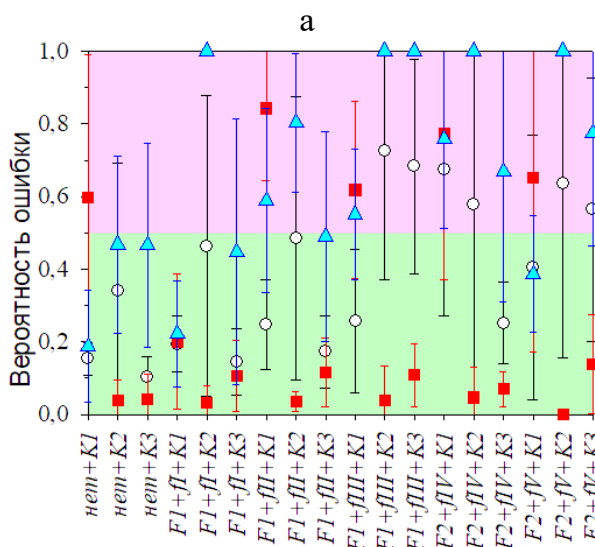
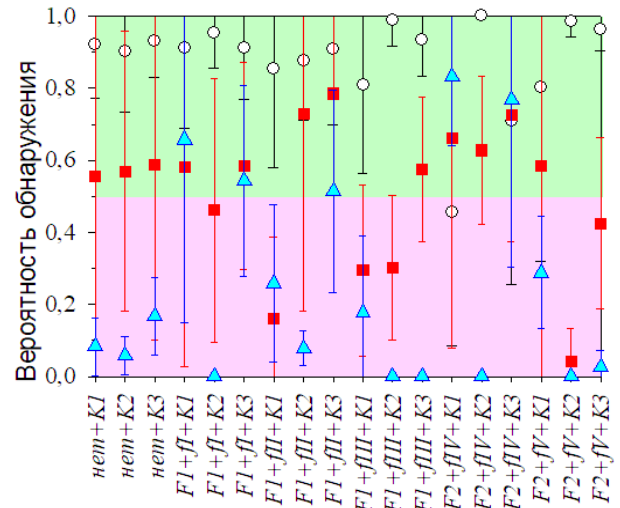
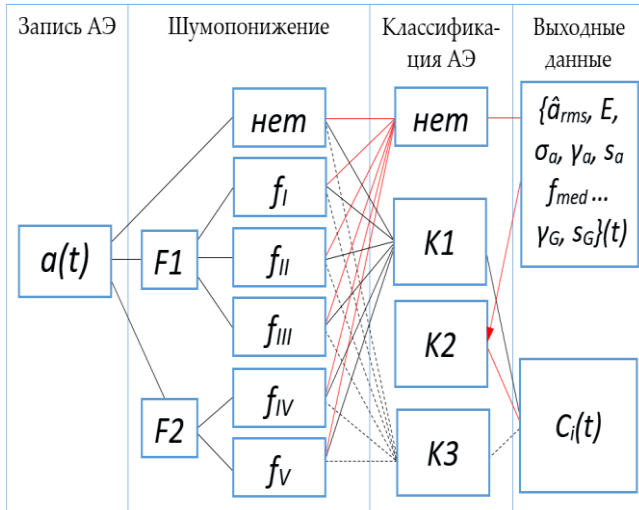


Рисунок 4 – Общая схема проведения экспериментального сравнения вариантов применения алгоритмов шумопонижения и кластеризации АЭ данных (а) и результаты определения оценочных параметров их эффективности:  $P_{01}$  (б),  $P_{02}$  (в) и  $b$  и  $N_b$  (г), где символ  $\circ$  обозначает кластер АЭ, связанный с абразивным износом;  $\triangle$  - с адгезионным износом со схватыванием в отдельных точках;  $\blacksquare$  - с адгезионным износом с отеснением металла (присущего схватыванию по площади, задиру и сварке узла трения)

На рисунке 4а обозначено:  $a(t)$  – исходная запись АЭ,  $\{\hat{a}_{rms}, E, \sigma_a, \gamma_a, s_a, f_{med} \dots \gamma_G, s_G\}(t)$  – расчетные параметры оценки АЭ,  $C_i(t)$  – присвоенный номер АЭ группы



(кластера) по кадрам АЭ, остальные обозначения расшифрованы в тексте. Величины  $P_{01}$  и  $P_{02}$  рассчитывали, как:

$$P_{01} = N_j / N_{\Sigma}, \quad (16)$$

где:  $N_j$  – количество кадров АЭ, отнесенных к одному из основных кластеров  $j = 1, 2, 3, \dots$ ;  $N_{\Sigma}$  – общее количество кадров АЭ,  $N_{\Sigma} = \sum N_j$ .

$$P_{02} = 1 - N_j / N_{j\Sigma}, \quad (17)$$

где:  $N_{j\Sigma}$  – количество кадров АЭ, отнесенных к одному из основных кластеров  $j$ , но рассчитанное по всей контрольной выборке, т.е. и между, и за временными метками действия соответствующих источников АЭ.

Результаты расчета оценки эффективности вариантов совмещения способов фильтрации и кластеризации АЭ  $P_{01}$ ,  $P_{02}$ ,  $b$  и  $N_b$  для данных полученных на четырехшариковой машине трения приведены на рисунках 4б-4г. Из рисунков видно, что из исследованных восемнадцати вариантов сочетаний применения выбранных схем непрерывной обработки АЭ данных наиболее эффективные для применения в разработанном методе три из них (обеспечивают большую  $P_{01}$  при меньших  $P_{02}$ ,  $b$  и  $N_b$ ) – это схемы: « $F1+f_I+K1$ », « $F1+f_I+K3$ » и « $F1+f_{II}+K3$ ».

Кроме этого, результаты исследований показали, что применение даже «щадящих» алгоритмов шумопонижения может привести к негативному результату работы алгоритмов разделения (классификации, кластеризации) АЭ данных. Следует также выделить, что большой разброс погрешности на рисунках 4б и 4в обусловлен тем, что контрольная выборка АЭ данных для экспериментального сравнения включала испытания при всех обозначенных выше условиях смазывания, кроме воды. Разные условия смазывания даже при одинаковых нагрузках обуславливают разный масштаб разрушения при действии одних и тех же механизмов повреждения, что отражается и на сопутствующей АЭ. Кроме этого, обозначенные результаты получены без объединения переработанных кластеров. Поэтому, если использовать анализ АЭ внутри одного условия смазывания и применять процедуры объединения кластеров, то снижается не только погрешность оценки  $P_{01}$  и  $P_{02}$ , но и повышается до приемлемого уровня результативность применения ряда исследованных вариантов, в частности: « $F1+f_I+K3$ », « $F1+f_{II}+K3$ », « $F2+f_{IV}+K3$ », « $F2+f_V+K1$ », « $F2+f_V+K3$ ». Однако на основании наилучших результатов исследования для промышленной апробации предложенного метода анализа АЭ основным выбран вариант « $F1+f_I+K1$ ».

В завершении пятой главы приведены результаты экспериментального исследования работоспособности предложенных в работе критериев оценки класса опасности для II уровня метода – формулы (7)-(9). Исследования проведены на АЭ данных, полученных при сопровождении испытаний на рост усталостных трещин образцов из стали 09Г2С и 20Л по ASTM E647. Необходимые для реализации предлагаемого метода опорные данные получали путем применения специального

графика нагружения материала (рисунок 3а) без и со смазыванием устья трещины, находящейся на линейной стадии своего развития. По изменению АЭ при варьировании нагрузки и условий трения берегов трещины установлены временные метки АЭ, связанные с этим источником (показаны стрелкой на рисунке 5б). На рисунке 5б для максимальной наглядности приведены два крайних случая: сухое трение берегов трещины при максимальной пластической деформации в вершине трещины и скорости ее роста (красный цвет) и трение берегов трещины со смазкой при минимальной нагрузке без развития пластической деформации и трещины (желтый цвет).

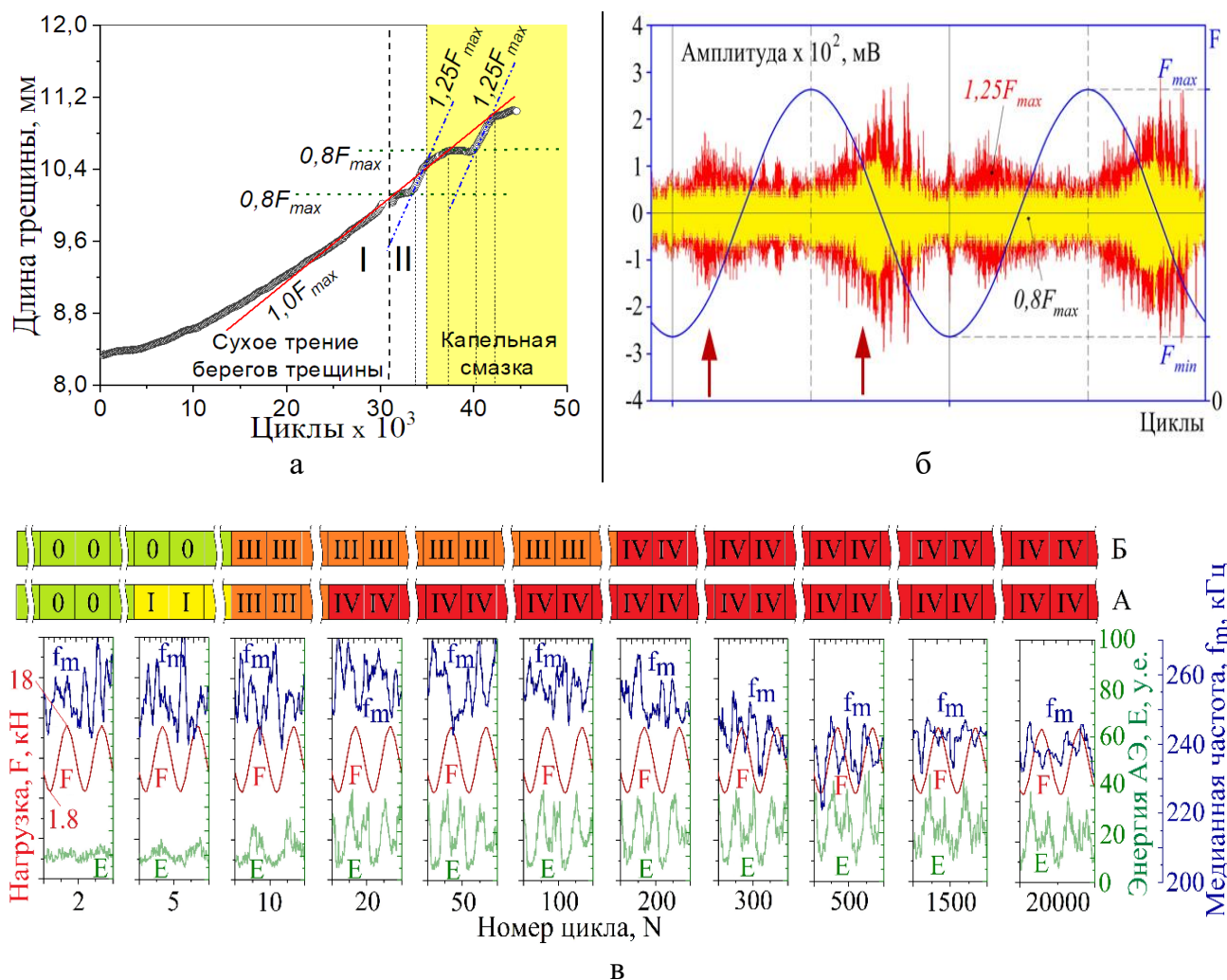


Рисунок 5 – График нагружения образцов при исследовании источников АЭ, сопровождающих рост усталостных трещин в вязких материалах (а), общий вид АЭ, сопровождающий циклы нагружения образца в двух крайних условиях испытаний (б), общий характер изменения энергии АЭ ( $E$ ) и медианной частоты ( $f_m$ ) с результатами применения разработанных критериев для анализа АЭ данных испытания на рост усталостной трещины

Отсутствие приращения трещины подтверждалось датчиком роста трещины и тепловизионными измерениями. Первый показал колебание длины трещины равно  $0,0093 \pm 0,0048$  мм, что совпадает с паспортной погрешностью датчика равной  $\pm 0,0088$  мм при длине трещины  $3 \div 25$  мм. Тепловизором подтверждалось отсутствие нагрева в

вершине трещины, который, как известно, сопровождает ее рост. АЭ от трения берегов трещины решено было использовать в качестве диагностического признака (опорных данных) свидетельствующего о наличии усталостной поврежденности материала. Это связано с тем, что данный источник имеет достаточно мощные АЭ сигналы и проявляется два раза за цикл нагружения (рисунки 5б и 5в) даже без подрастания (скачка) трещины. Последнее на ранней стадии её развития является статистически редким событием.

Полученные данные лабораторных исследований на рост усталостных трещин были применены в двух направлениях: (i) для оценки работоспособности предложенных в третьей главе кластерно-энергетического (А) и частотно-энергетического (Б) критериев оценки класса опасности АЭ источников на II уровне анализа (формулы (7)-(9)); (ii) при разработке методики ранжирования цапф сушильных цилиндров по поврежденности усталостными трещинами. Результаты последнего будут освещены далее, а результаты оценки работоспособности критериев А и Б представлены на рисунке 5в в виде хронологических лент. Где цвет и цифры «I-IV» показывают класс опасности согласно ПБ 03-593-03, «0» - источник АЭ не обнаружен.

Примем появление IV класса опасности источника АЭ за критическую точку эксплуатации материала. Тогда из рисунка 5в видно, что оба критерия позволяют выявить трещину, но имеют разную чувствительность. Так, при использовании критерия Б устойчивое обнаружение трещины происходит позже в среднем на  $80 \pm 43$  циклов, чем – критерия А. При этом критерий Б относительно А имеет более простой математический аппарат, а поэтому имеет более быстрый счет и требует меньшей вычислительной мощности. Однако критерий А более универсален и может быть адаптирован под любую форму кривой изменения энергии АЭ за цикл нагружения. Для этого достаточно переназначить положение центроидов кластеров ( $c_i$ ). Несмотря на это, полученные результаты подтверждают работоспособность двух предложенных критериев для реализации на II уровне предложенного метода анализа АЭ.

В **шестой главе** приведены результаты апробации предложенного метода для решения четырех принципиально разных практических задач, которые в совокупности обеспечивают широкий охват направлений применения метода АЭ и подтверждают универсальность предложенного подхода анализа шумоподобной АЭ разной физической природы и его работоспособность.

Первыми представлены результаты применения предложенного метода для обнаружения схватывания и задира поверхностей тяжело нагруженных узлов трения-скольжения. Известно, что при нарушении условий смазывания задир является критическим режимом изнашивания, часто приводящим к выходу узла трения из строя, а повышение частоты схватывания поверхностей является его предвестником, т.е. ранней стадией. Поэтому выявление начала схватывания является актуальной диагностической задачей, решение которой в работе пошагово продемонстрировано на примере анализа

АЭ, полученной при исследовании защитных свойств смазочных материалов нескольких типов на ЧМТ-1 путем ступенчатого нагружения по графику, представленному на рисунке 6. При этом опорные данные, диагностические АЭ-признаки и параметры оценки для каждого уровня анализа получены по варианту « $F1+f1+K1$ » (см. описание пятой главы и рисунок 4) при  $R^2 \geq 0,85$ , которые подытожены в таблицах 1-3 в виде диагностических матриц. На рисунке 6 и таблицах 1-3 обозначение кластеров АЭ соответствует рисунку 4, но они здесь представляют диагнозы:  $D_1$  – нормальный режим изнашивания (○-сигналы);  $D_2$  – трение со схватыванием (▲-сигналы) и  $D_3$  – задиры поверхностей трения (■-сигналы).

Также на рисунке 6 представлен пример получаемого объема данных при применении предлагаемого метода, где по временным проявлениям кластеров  $D_1 \div D_3$  (верхняя часть рисунка) и правилам принятия решения таблиц 1-3 построены хронологической карты разрушения узла трения (нижняя часть рисунка), которые построчно отображают: А – начало и продолжительность задира; В – время работы узла после задира; С – время приработки после задира; D и E – начало и продолжительность изнашивания по адгезионному механизму соответственно схватыванием и разрывом в отдельных точках и с отгеснением металла. При этом наличие цвета в каждой строке соответствует проявлению АЭ признака, т.е. логическому значению «1», а отсутствие, соответственно, «0».

Таблица 1

Диагноз $I.D_i$	Контрольные параметры I уровня обработки											$P(D_i)$
	$P, H$		- ▲ -		- ■ -		$f_m, \text{кГц}$			$W_{eff}, \text{y.e.}$		
	$<0,6P_k$	$\geq 0,6P_k$	+	-	+	-	$<62$	$62...68$	$>68$	$<20$	$\geq 20$	
$I.D_1$	0,9	0,1	0,3	0,7	0,1	0,9	0,1	0,6	0,3	0,2	0,8	0,15
$I.D_2$	0,6	0,4	0,7	0,3	0,7	0,3	0,2	0,2	0,6	0,1	0,9	0,38
$I.D_3$	0,2	0,8	0,4	0,6	0,8	0,2	0,7	0,2	0,1	0,9	0,2	0,47

где:  $I.D_i$  – диагноз  $D_i$  ( $i = 1 \dots 3$ ), установленный на соответствующем уровне анализа АЭ, в данном случае I,  $P$  – текущая нагрузка на узел трения;  $P_k$  – критическая нагрузка по задиру, установленная для каждого смазочного материала по ГОСТ 9490; ▲ и ■ – тип кластера по степени схожести экспериментальных кривых СПМ опорным при  $[R\text{-квadrat}] \geq 0,85$ ; «+»/«-» - присутствие/отсутствие кластера на временном отрезке оценки класса опасности;  $f_m$  и  $W_{eff}$  – медианная частота и эффективная ширина СПМ

Таблица 2

Диагноз $II.D_i$	Контрольные параметры II уровня обработки									$P(D_i)$
	$P, H$		$\bar{U}, B$		$\Delta\bar{U}, B$		$\Delta\tau, c$			
	$<0,6P_k$	$\geq 0,6P_k$	$<0,45$	$\geq 0,45$	$<0,2$	$\geq 0,2$	$< 1$	$1...10$	$> 10$	
$II.D_1$	0,9	0,1	0,6	0,4	0,9	0,1	0,9	0,1	0	0,15
$II.D_2$	0,6	0,4	0,4	0,6	0,3	0,7	0,8	0,2	0	0,38
$II.D_3$	0,2	0,8	0,4	0,6	0,7	0,3	0,1	0,7	0,2	0,47

где:  $\bar{U}$  – среднее значение  $a_{es}$  на расчетном временном интервале,  $\bar{U}^*$  – среднее значение  $a_{es}$  на предыдущем расчетном временном интервале;  $\Delta\bar{U}$  – размах значений  $a_{es}$  на расчетном временном интервале;  $\Delta\tau$  – длительность существования АЭ признака  $\bar{U} \geq 0,45$ ; остальные обозначения, как в таблице 1

Таблица 3

$D_i$	Контрольные параметры III уровня обработки													$P(D_i)$
	$I.D_2$		$I.D_3$		$II.D_2$		$II.D_3$		$E_c \blacktriangle / t$			$E_c \blacksquare / t$		
	+	-	+	-	+	-	+	-	< 2	2...3,8	$\geq 3,8$	< 3,8	$\geq 3,8$	
$D_1$	0,25	0,75	0	1,0	0,73	0,27	0,01	0,99	0,8	0,2	0	1,0	0	0,15
$D_2$	0,74	0,26	0,02	0,98	0,24	0,76	0,05	0,95	0,1	0,6	0,3	0,4	0,6	0,38
$D_3$	0,01	0,99	0,98	0,02	0,03	0,97	0,94	0,06	0	0,3	0,7	0,1	0,9	0,47

где:  $E_c \blacktriangle / t$  и  $E_c \blacksquare / t$  – логарифм кумулятивной средней мощности сигналов АЭ кластеров  $\blacktriangle$  и  $\blacksquare$ -типа, регистрируемых на текущем временном интервале оценки  $t$ ; остальные обозначения, как в таблице 1 и 2

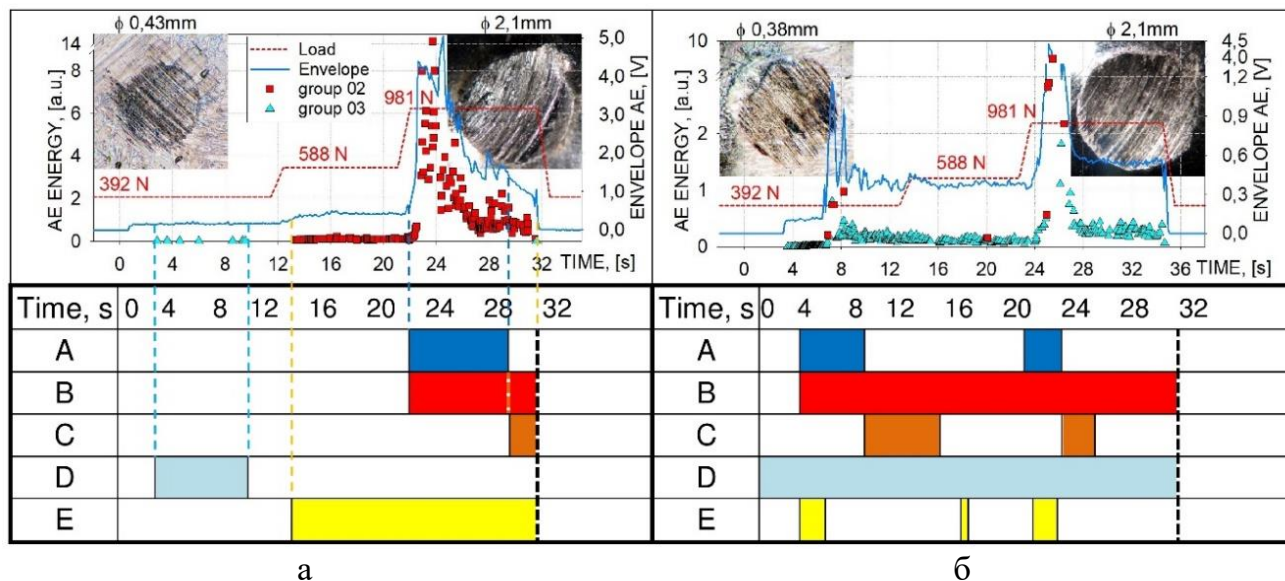


Рисунок 6 – Пример результатов обработки данных специальных испытаний на ЧМТ-1 с применением предлагаемого метода оценки спектрально-временного подобия АЭ (верхняя часть) и составленные по ним кластерно-временные хронологические карты (нижняя часть), полученные для условий смазывания: Фиол-1 (а) и Unirex-3 (б)

В конце первого пункта шестой главы показано, что получаемый после применения предлагаемого метода объем данных позволяет:

(i) расширить информативность испытаний на трение и износ путем использования АЭ анализа в спорных ситуациях, когда трибологические данные показывают одинаковый результат (например, на рисунке 6 приведены испытания, при которых сформировались одинаковые по размеру пятна износа - см. верхний правый край рисунков) и поэтому напрашивается вывод об их одинаковых противозадирных свойствах. Однако разработанные для ОАО «АвтоВАЗ» карты восстановления хронологии разрушения узла трения по АЭ данным (нижняя часть рисунка б) показывают, что стадийность и время работы до разрушения узла трения в сравниваемых условиях смазывания существенно отличались;

(ii) сократить длительность трибологических испытаний, которые часто являются весьма продолжительными и трудозатратными, за счет: остановки испытания сразу при наступлении АЭ признака критического повреждения; исключения операции

визуального подтверждения задира (подтверждение по АЭ признакам) и сокращения количества уточняющих испытаний (например, если итогом испытания является время наработки до задира, то для испытания на рисунке ба получим достаточную длительность испытания 32 с., а на рисунке бб – 12 с.);

(iii) повысить ресурс узлов трения-скольжения на основе применения АЭ средств обратной связи в системах управления режимом работы их элементов или узлов (например, на рисунке б в момент выявления источника ■-типа и выполнения условий таблицы 3, свидетельствующих о граничных условиях смазывания, подается дополнительный смазочный материал под давлением, что устраняет возникновение задира).

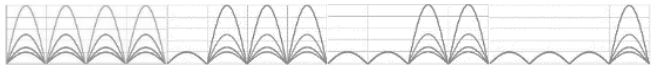
Оценка эффективности обнаружения схватывания и задира поверхностей трения предлагаемым методом проведена сравнением с амплитудным пороговым методом путем расчета апостериорной вероятности постановки диагнозов  $D_2$  и  $D_3$  по таблицам 1÷3 с использованием метода Байеса. Согласно полученным опорным данным ранее подтверждение диагноза  $D_2$  на I уровне обработки возможно при: [ $P < 0,6P_k$ ,  $\blacktriangle = \langle\langle + \rangle\rangle$  и  $\blacksquare = \langle\langle - \rangle\rangle$  (что означает: имеются / не имеются сигналы соответствующего кластера),  $f_m > 68$  кГц,  $W_{eff} \geq 20$  у.е.], а на II уровне обработки: [ $P < 0,6P_k$ ;  $\bar{U} < 0,45B$ ;  $\Delta\bar{U} < 0,2B$ ;  $\Delta\tau < 1$  с]. Раннее подтверждение задира ( $D_3$ ) соответственно: [ $P \geq 0,6P_k$ ,  $\blacktriangle = \langle\langle + \rangle\rangle$ ,  $\blacksquare = \langle\langle + \rangle\rangle$ ,  $f_m < 62$  кГц,  $W_{eff} < 20$  у.е.] и [ $P \geq 0,6P_k$ ;  $\bar{U} \geq 0,45B$ ;  $\Delta\bar{U} < 0,2B$ ;  $\Delta\tau = 1 \dots 10$  с]. Результаты расчета апостериорных для I и II уровня, и априорных для III уровня анализа вероятностей диагнозов  $D_1$ ,  $D_2$  и  $D_3$  по обобщенной формуле Байеса приведены в таблице 3 соответственно в колонках:  $I.D_2$ ,  $I.D_3$ ,  $II.D_2$  и  $II.D_3$ . На III уровне анализа вероятность раннего обнаружения диагноза  $D_2$  определяют следующие значения диагностических параметров [ $I.D_2 = \langle\langle + \rangle\rangle$ ;  $I.D_3 = \langle\langle - \rangle\rangle$ ;  $II.D_2 = \langle\langle + \rangle\rangle$ ;  $II.D_3 = \langle\langle - \rangle\rangle$ ;  $E_c\blacktriangle/t = 2 \dots 3,8$ ;  $E_c\blacksquare/t < 3,8$ ], а раннего обнаружения диагноза  $D_3$ : [ $I.D_2 = \langle\langle + \rangle\rangle$ ;  $I.D_3 = \langle\langle + \rangle\rangle$ ;  $II.D_2 = \langle\langle + \rangle\rangle$ ;  $II.D_3 = \langle\langle + \rangle\rangle$ ;  $E_c\blacktriangle/t \geq 3,8$ ;  $E_c\blacksquare/t \geq 3,8$ ]. По которым аналогично получаем значения апостериорных вероятностей установления диагнозов  $D_2$  и  $D_3$  на III уровне предлагаемого метода:  $P(D_2/III.D_2) = 0,73$  и  $P(D_3/III.D_3) = 0,87$  и амплитудным пороговым методом. Последний по возможности раннего установления диагноза  $D_2$  близок к варианту  $P(D_2/II.D_2) = 0,24$ , а диагноза  $D_3$  варианту  $P(D_3/II.D_3) = 0,94$ . Таким образом, предлагаемый метод по сравнению с пороговым подходом позволила в 3 раза (на 49%) увеличить вероятность обнаружения схватывания поверхностей трения (диагноз  $D_2$ ), при приемлемом (в 1,08 раз или на 7 %) снижении вероятности обнаружения задира (диагноз  $D_3$ ).

Второй задачей, на которой был апробирован предлагаемый метод является обнаружение усталостных трещин в циклически нагруженном материале силовых элементов промышленного оборудования. Исследование проведено путем ранжирования цапф сушильных цилиндров картоноделательной машины (КДМ) по степени усталостной поврежденности их материала в опасном сечении с последующим подтверждением



ультразвуковым (УЗ) контролем. Исходными данными для исследования являлись: статистика аварий на производстве и результаты их анализа; результаты оценки механических характеристик материала и АЭ опорные данные, полученные в результате испытаний материала цапф (20Л) на рост усталостной трещины (см. описание пятой главы и рисунок 5). Как показано выше, мощным и всегда сопровождающим нагружение материала с усталостной трещиной источником АЭ является трение ее берегов, поэтому диагностические признаки данного типа источника положены в основу методики обнаружения трещин в материале. Диагностические признаки источника были сформированы на основе описанных выше лабораторных испытаний, скорректированы непосредственно на объекте контроля и подытожены по каждому уровню анализа в таблице 4, где:  $\dot{N}(t)$  – активность АЭ;  $\bar{a}_N$  – среднее значение  $\dot{N}(t)$ ;  $R^2_1$  и  $R^2_2$  – критерии алгоритма  $KI$  (формула (12)), соответственно, используемые для оценки подобия кривых изменения  $\bar{a}_N$  опорным данным (средние кривые изменения  $\bar{a}_N$  при АЭ измерениях на «бездефектных» цапфах) и между циклами нагружения цапф.

Таблица 4

Уровень анализа	Контрольный параметр	Степень дефектности цапф		
		Низкая	Средняя	Высокая
I	Амплитуда, дБ MARSE, у.е.	< 60 < $3,3 \cdot 10^7$	60...70 (3,3...6,7)· $10^7$	> 60 > $6,7 \cdot 10^7$
II	$\dot{N}$ , имп/с	< 36	$\geq 70$	$\geq 90$
	$R^2_1$ $R^2_2$	не определяется не определяется	< 0,15 > 0,3	< 0,15 > 0,3
III	Количество повторов	не определяется	3 из 5 циклов нагружения (оборотов)	
	Общий вид $\bar{a}_N$ за оборот	не определяется		

На основании полученных данных была разработана трехуровневая АЭ методика ранжирования приводных и лицевых цапф по степени их усталостной поврежденности (Методика № МАЭК-СЦКДМ-001-2019. Акт внедрения Филиала АО «Группа ИЛИМ», г.Коряжма) с целью планирования ремонта и замены цилиндров секции сушки КДМ. Проверка достоверности разработанной АЭ методики проводилась сопоставлением результатов АЭ измерений 2018, 2019 и 2021 г. с результатами УЗ контроля, выполненного в то же время. Матрица достоверности АЭ методики и результат ее оценки представлен в таблице 5.

Из таблице 5 следует, что достоверность АЭ методики составила  $D_{АЭ} = 73\%$  при вероятности пропуска дефекта  $P_\beta = 10\%$  и перебраковки  $P_\alpha = 17\%$ . Высокое значение  $D_{АЭ}$  подтверждает работоспособность разработанной АЭ методики. Однако процент перебраковки показывает, что еще есть другие АЭ источники, требующие выявления и

учёта их при анализе результатов АЭ измерений. Поэтому, несмотря на внедрение методики на практике, запланировано ее дальнейшее совершенствование. Кроме этого на данном типе оборудования АЭ методом по сравнению с УЗ методом получено более чем двукратное превышение скорости контроля, что связано с отсутствием необходимости для АЭ измерений выполнения объёмных демонтажно/монтажных работ.

Таблица 5

Метод контроля и оценка его результатов для всех объектов сравнения, $n_{\Sigma} = 68$ цапф		Эталонный метод контроля дефекта в цапфах – ультразвуковой	
		Число эталонно годных цапф	Число эталонно негодных цапф
АЭ контроль по МАЭК-СЦКДМ-001-2019	Число годных цапф	Дважды годные $n_{\Gamma} = 44$	Недобраковка $n_{\beta} = 6$
	Число негодных цапф	Перебраковка $n_{\alpha} = 12$	Дважды негодные $n_{\Pi} = 6$
$D_{АЭ} = (n_{\Gamma} + n_{\Pi}) / n_{\Sigma} = 0,73$ ; $P_{\beta} = n_{\beta} / n_{\Sigma} = 0,10$ ; $P_{\alpha} = n_{\alpha} / n_{\Sigma} = 0,17$			

Третьей задачей на которой был апробирован предлагаемый метод является повышение вероятности обнаружения течи среды (негерметичности) ёмкостного промышленного оборудования, где стандартный амплитудный пороговый метод не позволил локализовать место течи (рисунок 7). Исследование проведено на данных полученных при гидравлическом испытании (ГИ) гуммированного изнутри резервуара хранения щелочи при давлении среды 0,1 МПа. Имитация АЭ на универсальном учебно-исследовательском стенде (или УУИС, который описан далее) посредством капельного режима истечения жидкой среды через жиклёры различного диаметра показала, что спектр АЭ от течи отличается от фонового шума наличием более высокочастотных составляющих. Поэтому за опорные данные для реализации метода был взят окружающий шум, записанный перед ГИ (группа сигналов 1 на рисунке 7).

Далее, используя средний спектр шума и первый уровень анализа (рисунок 2) с алгоритмом  $K1$  (формула (12)) при  $R^2 \geq 0,4$  для обработки массива АЭ данных, полученных при ГИ была выявлена группа сигналов, имеющая в спектре четко выделенную высокочастотную составляющую в области 60÷80 кГц и амплитуду во временной области выше шума на 2-4 дБ (рисунок 7). Поскольку эти сигналы соответствовали вышеобозначенному диагностическому признаку, то они были отнесены к АЭ от течи и использованы для ее локализации. Последнее проводилось модифицированным триангуляционным методом (Патент № 2515423. Акт внедрения ООО «ЛАЭС» г. Тольятти) отличающийся тем, что разность времен прихода (РВП) соответствовала разности времен кадров сигналов второго кластера, полученных по разным каналам регистрации АЭ. При этом РВП определяется через процедуру бинаризации записей АЭ путем присвоения временным участкам занимаемых кадрами первой группы «0», а второй группы «1» (рисунок 7). Ремонт резервуара в обнаруженном месте и повторное его ГИ с выдержкой в течение 24 часов подтвердило факт правильного



обнаружения места пропуска. А проведенные оценки показали, что предлагаемый метод по сравнению с амплитудным пороговым методом позволил в 6,1 раз (на 33,6 %) повысить вероятность обнаружения источника при 7-кратно меньших затратах, связанных с дополнительным контролем и ремонтом гуммированного слоя в местах ошибочно назначенных по АЭ данным. Полученные результаты также подтверждают возможность локации шумоподобных источников АЭ на I уровне предлагаемого метода (рисунок 2) посредством применения модифицированного алгоритма локации.

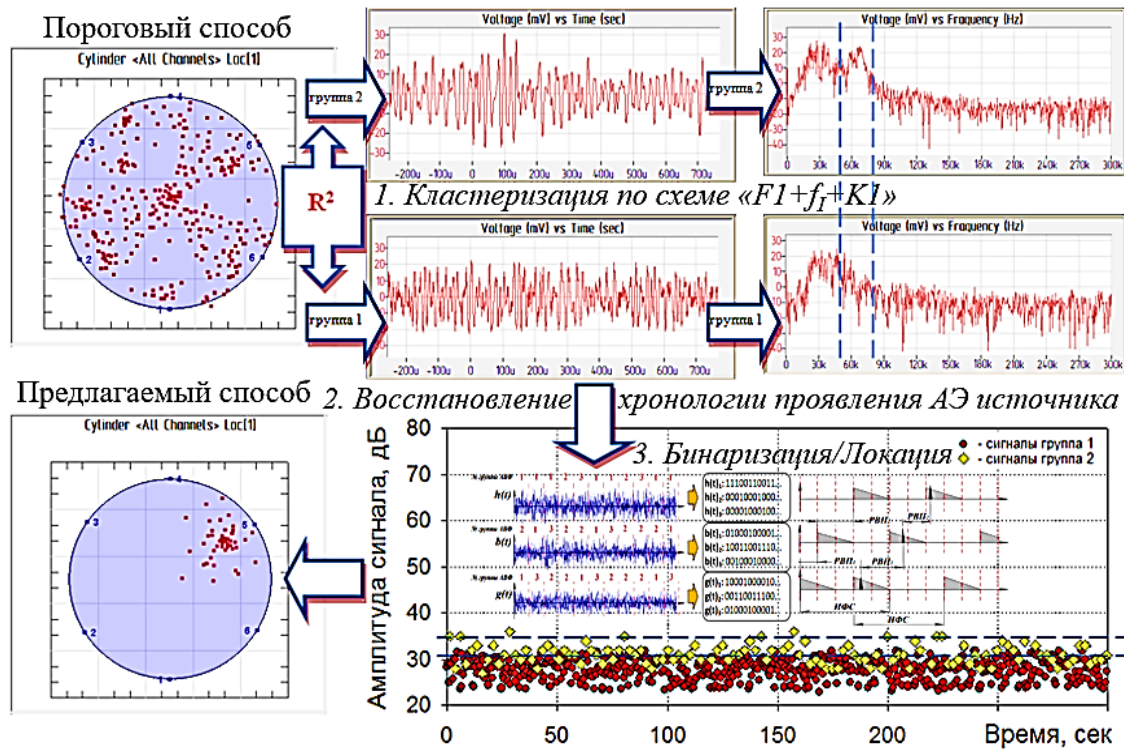


Рисунок 7 – Пример повышения точности локации шумоподобных источников АЭ на примере поиска утечки среды из резервуара

Четвертой задачей на которой был апробирован предлагаемый метод, является организация обратной связи для контроля режима работы роторного оборудования на основе метода АЭ на примере поддержания режима обеззараживания смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) «Автокат Ф-40». Последнее требуется в виду того, что непосредственно во время обработки СОЖ из-за нагрева, насыщения газом, разложения компонентов и др. факторов изменяются её физико-химические свойства. Из-за этого фиксированный режим обработки не может быть эффективным и требуется его постоянная корректировка. Здесь для получения опорных данных, необходимых для реализации метода (рисунок 2), использовались универсальная роторная установка безреагентной обработки жидких сред и её уменьшенная копия с прозрачной рабочей камерой для возможности организации видеонаблюдения. В результате видеонаблюдения и биологических исследований установлено, что максимальный эффект обработки СОЖ достигается на режиме течения среды с вихреобразованием, который сегодня выявляется и контролируется с применением метода шумометрии.

Проведенное экспериментальное сравнение эффективности применения метода шумометрии и АЭ показало, что АЭ метод менее подвержен влиянию окружающего внешнего шума и вибрации элементов роторной установки, поэтому более надёжен и выбран за основу. Следует заметить, что предлагаемый метод универсален и в случае перевеса преимуществ метода шумометрии может быть реализован для анализа сигналов звукового диапазона.

В результате применения предлагаемого метода (рисунок 2) с алгоритмом  $KI$  (формула (12)) при  $R^2 \geq 0,3$  и сопоставлении с данными видеонаблюдения на уменьшенной копии роторной установки был выявлен кластер сигналов, связанный с вихреобразованием (■ - на рисунке 8). АЭ признаки вихреобразования были скорректированы на универсальном стенде при сопоставлении результатов с биологическими исследованиями изменения качества СОЖ после обработки имевшей первоначальное заражение бактериями и грибами на уровне концентраций  $10^6$  и  $10^3$  КОЕ/мл соответственно. В результате были сформированы диагностические признаки АЭ источников в виде течения среды без (диагноз  $D_1$ ) и с вихреобразованием (диагноз  $D_2$ ), которые по каждому уровню анализа подытожены в таблицах 6÷8.

Таблица 6

Диагноз $I.D_i$	Контрольные параметры I уровня обработки						$P(D_i)$
	- ■ -		$f_m$ ■, кГц		$f_c$ ■, кГц		
	+	-	< 250	$\geq 250$	< 100	$\geq 100$	
$I.D_1$	0,4	0,6	0,3	0,7	0,2	0,8	0,23
$I.D_2$	0,8	0,2	0,6	0,4	0,7	0,3	0,77

где:  $I.D_i$  – диагноз  $D_i$  ( $i = 1$  и  $2$ ), установленный на соответствующем уровне анализа АЭ, в данном случае I, ■ – тип кластера по степени схожести экспериментальных кривых СПМ опорным при  $[R\text{-квadrat}] \geq 0,3$ ; «+» / «-» - присутствие / отсутствие кластера на временном отрезке оценки эффективности обработки СОЖ;  $f_m$  ■ и  $f_c$  ■ – медианная и центральная частота СПМ сигналов ■-типа

Таблица 7

Диагноз $II.D_i$	Контрольные параметры II уровня обработки						$P(D_i)$
	$\bar{U}, B$		$R\text{-квadrat}$		$\Delta\tau, c$		
	< 0,5	$\geq 0,5$	< 0,3	$\geq 0,3$	< 60	$\geq 60$	
$II.D_1$	0,6	0,4	0,6	0,4	0,5	0,5	0,23
$II.D_2$	0,4	0,6	0,4	0,6	0,7	0,3	0,77

где:  $\bar{U}$  – среднее значение  $RMS$  на расчетном временном интервале оценки эффективности обработки СОЖ;  $\Delta\tau$  – длительность цикла воздействия с  $\bar{U} \geq 0,5$ ;  $R\text{-квadrat}$  – степень похожести кривой изменения  $\bar{U}$  опорной кривой при соответствующей  $\Delta\tau$

Таблица 8

$D_i$	Контрольные параметры III уровня обработки						$P(D_i)$
	$I.D_2$		$II.D_2$		$N \bullet / N \blacksquare$		
	+	-	+	-	< 4	$\geq 4$	
$D_1$	0,02	0,98	0,09	0,91	0,6	0,4	0,23
$D_2$	0,98	0,02	0,91	0,09	0,8	0,2	0,77

Обозначения расшифрованы в тексте

Оценка эффективности применения предлагаемого метода в данном направлении также сравнивалась со стандартным амплитудным пороговым методом с помощью расчета апостериорных вероятностей по данным таблиц 6÷8. Так, в результате исследований установлено, что эффект обеззараживания СОЖ достигался при значениях [ $\square = \langle + \rangle$ ;  $f_m \square < 250$  кГц;  $f_c \square < 100$  кГц] на I уровне и при [ $\bar{U} \geq 0,5$  В;  $R$ -квадрат  $\geq 0,3$ ;  $\Delta\tau < 60$  с] на II уровне обработки АЭ данных. Результаты расчета по обобщенной формуле Байеса вероятностей поддержания режима на I и II уровне анализа под обозначениями  $I.D_2$  и  $II.D_2$  сведены в таблицу 8. Где также приведено отслеживаемого на III уровне анализа значение соотношения между количеством сигналов  $\bullet$ -типа к  $\square$  - типу (параметр  $N \bullet / N \square$ ). Итоговая апостериорная вероятность поддержания эффективного режима обработки СОЖ с применением предлагаемого метода задается значениями [ $I.D_2 = \langle + \rangle$ ;  $II.D_2 = \langle + \rangle$ ;  $N \bullet / N \square < 4$ ] и равна:  $P(D_2/III.D_2) = 0,999$ . Эффективный режим обработки СОЖ пороговым АЭ методом по  $RMS$  достигался при [ $\bar{U} \geq 0,5$  В;  $\Delta\tau < 60$  с], который по данным таблицы 7 возможно поддерживать с вероятностью  $P^*(D_2/II.D_2) = 0,87$ . Последнее является высоким показателем, но ниже в 1,15 раз (на 12,9%) и не является стабильным, т.к. достижим только в случае, когда во время обработки СОЖ не происходит нагрев и изменение свойств обрабатываемой среды. На основе полученных данных была предложена и апробирована схема самонастраивающейся системы контроля режима обработки жидких сред в роторных устройствах с обратной связью по сигналам АЭ.

В **седьмой главе** описываются средства, разработанные для обеспечения возможности практической реализации предлагаемого метода и способствующие сокращению времени на его внедрение, а именно: экспериментальный образец интеллектуальной АЭ системы мониторинга (ЭО ИСМ АЭ) промышленных объектов и универсальный учебно-исследовательский стенд (УУИС). ЭО ИСМ АЭ представляет собой стандартный промышленный компьютер с универсальной платой аналого-цифрового преобразования (АЦП). В нем для записи АЭ используется стандартное программное обеспечение платы АЦП, а для её обработки оригинальный экспериментальный образец программного обеспечения, в котором реализован предлагаемый метод на базе описанных выше алгоритмов шумопонижения, кластеризации, локации и оценки степени опасности АЭ источников. Еще одной отличительной особенностью ЭО ИСМ АЭ является то, что для обеспечения надежной регистрации АЭ с промышленного оборудования высокой вибро- и/или термонагруженности разработаны (рисунок 8): преобразователь АЭ повышенной надежности (ПАЭПН) и универсальный волновод АЭ (УВАЭ). Отличительной особенностью ПАЭПН является возможность управления его надежностью в процессе применения/эксплуатации за счет интегрированных в преобразователь дублирующих линий регистрации АЭ с несколькими способами их подключения к блоку обработки

информации (I, II и III – рисунок 8а), что позволяет компенсировать потерю работоспособности дублирующих линий в ПАЭПН или полный отказ соседнего ПАЭПН в антенной группе (Патент № 2601270. Акт внедрения ООО «ЛАЭС» г. Тольятти). Отличительной особенностью УВАЭ является возможность управления его теплорассеивающими характеристиками при сохранении длины волновода и акустических потерь в нем, что достигается применением пакета накладные рассеиватели тепла разборной конструкции (Патент № 2665360. Акт внедрения ООО «Диагност», г. Тольятти). Проведенный полный цикл исследований характеристик опытных образцов ПАЭПН и УВАЭ показал, что предложенные технические решения в ПАЭПН позволяют обеспечить непрерывный АЭ контроль в течение 10 лет в диапазоне температур от  $-65$  до  $+65$  °С с вероятностью безотказной работы на  $37 \div 70$  % выше стандартных преобразователей АЭ. Кроме того, использование УВАЭ предлагаемой конструкции позволяет обеспечить выполнение АЭ измерений на объекте контроля, нагретого до в  $1,5 \div 2,1$  раза большей температуры, чем в случае применения в качестве волновода гладкого стержня (являющегося на сегодняшний день основным техническим решением) при одинаковых размерах по длине и диаметру.

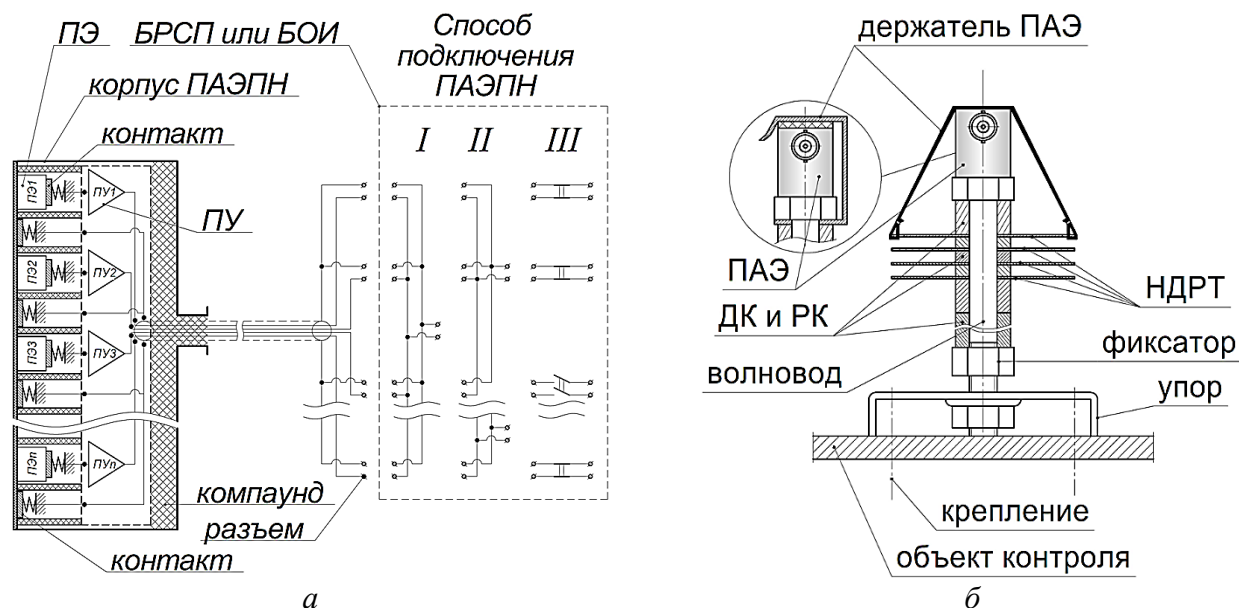


Рисунок 8 - Принципиальные схемы ПАЭПН (а) и УВАЭ (б), где: ПЭ – пьезоэлемент, ПУ – предварительный усилитель, БРСП – блок развязки сигнал/питание, БОИ – блок обработки информации, ПАЭ – преобразователь АЭ; ДК и РК – дистанционные и распорные кольца; НДРТ – накладные дисковые рассеиватели тепла

Для получения исходных опорных данных для выполнения АЭ контроля предлагаемым методом ёмкостного промышленного оборудования (СО) был разработан и изготовлен оригинальный универсальный учебно-исследовательский стенд (УУИС) изучения генерации и распространения АЭ (Патент № 2608969. Акт внедрения ФГБОУ ВО «ТГУ», г. Тольятти), который показан на рисунке 9 и позволяет получать в лабораторных условиях требуемый массив АЭ данных. Обозначенный результат



достигнут путем размещения всех вышеуказанных имитаторов АЭ (рисунок 3б-е) на трех макетах, имитирующих основные (наиболее распространенные) типы СО, а именно макеты: объемного (сосуды, аппараты и т.д.), линейного (трубопроводы, печи и т.д.) и плоскостного оборудования (резервуары, газгольдеры и т.д.).



Рисунок 9 – Общий вид УУИС со схематичным отображением его отличительных особенностей при имитации повреждений статически нагруженного оборудования

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Сигналы АЭ амплитудой ниже теоретически возможного для применения порогового уровня дискриминации могут быть обнаружены на основе оценки подобия проявления АЭ признаков источников на трех временных масштабах при любом ненулевом значении вероятности обнаружения источника на первом и втором масштабном уровне анализа данных.

2. Опорные АЭ признаки при нескольких одновременно действующих трибологических и аэрогидродинамических источниках могут быть получены на статическом и динамическом промышленном оборудовании без их критического повреждения посредством использования имитаторов АЭ специального вида или остановкой испытания по АЭ данным.

3. Применение даже щадящих алгоритмов шумопонижения может привести к негативному результату применения беспорогового метода анализа шумоподобных АЭ сигналов. Из восемнадцати исследованных схем применения алгоритмов шумопонижения и классификации АЭ были установлены и реализованы в экспериментальном образце АЭ системы три наиболее эффективных варианта.

4. На основании учета спектральных особенностей источников АЭ возможно в 3 раза (на 49%) увеличить вероятность обнаружения схватывания поверхностей трения, при

приемлемом (в 1,08 раз или на 7 %) снижении вероятности обнаружения задира по сравнению с амплитудным пороговым методом, что позволило предложить новый научный подход, позволяющий: восстановить хронологию разрушения контактирующих материалов, сократить общее время трибологических испытаний и повысить ресурс узлов трения-скольжения.

5. На основании отслеживания подобия проявления АЭ признаков возможно ранжировать цапфы сушильных цилиндров картоно- и бумагоделательных машин по степени их поврежденности усталостными трещинами с достоверностью на уровне 73% относительно ультразвукового контроля, при вероятности пропуска повреждения и перебраковки изделия 10 и 17% соответственно.

6. На основании учета спектральных особенностей источников АЭ возможно при контроле емкостного оборудования повысить вероятность обнаружения координат АЭ источника гидродинамического типа в 6,1 раз (на 33,6 %), при 7-кратно меньших затратах по сравнению с амплитудным пороговым методом.

7. На основании учета спектральных особенностей источников АЭ возможно поддержание режима работы роторной установки позволяющий обеспечить уничтожение в смазочно-охлаждающей жидкости бактерий и грибов с концентрацией соответственно  $10^6$  и  $10^3$  КОЕ/мл с вероятностью минимум в 1,15 раз (на 12,9%) выше по сравнению с амплитудным пороговым методом.

8. Разработанные технические решения позволяют компенсировать потерю работоспособности преобразователей АЭ в антенной группы и обеспечить непрерывность контроля объекта в диапазоне температур от минус 65 до плюс 65 °С в течении 10 лет с вероятностью на 37÷70 % выше стандартных преобразователей АЭ.

### СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Растегаев, И.А.** Основы эффективной организации акустико-эмиссионного контроля / И.А. Растегаев, Д.Л. Мерсон, А.К. Хрусталева и др. // Контроль.Диагностика. – 2015. – № 12. – С. 41 – 49.
2. Danyuk, A. Improving of acoustic emission signal detection for fatigue fracture monitoring /A. Danyuk, **I. Rastegaev**, E. Pomponi, A. Vinogradov, M. Linderov, D. Merson // Procedia Engineering. – 2017. – 176. – С.284-290.
3. **Rastegaev, I.A.** Universal Educational and Research Facility for the Study of the Processes of Generation and Propagation of Acoustic Emission Waves / I. A. Rastegaev, A. V. Danyuk, D. L. Merson, A. Yu. Vinogradov // Inorganic Materials. – 2017. – Том 53, № 15. – С. 1548-1554.
4. **Rastegaev, I. A.** Evaluating the Probability of Detecting Acoustic Emission Signals Using the Amplitude Discrimination Method with a Low Signal-to-Noise Ratio / I. A. Rastegaev, I.

- S. Yasnikov, I. I. Rastegaeva, E.A. Agletdinov, D.L. Merson // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2022. – 58(3). – С. 157–166.
5. **Rastegaev, I. A.** Estimating the Probability of Detecting a Delamination in the Wall of Equipment Depending on the Set of Used Methods of Nondestructive Testing and Ways of Its Improvement / I. A. Rastegaev, V. P. Gomera, S. A. Tyupin et al.// Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – 54(9). – С. 619-629.
  6. **Rastegaev, I.** Enhancement of efficiency of tribological testing by using acoustic emission measurements / I.Rastegaev, D.Merson, A.Vinogradov // Proceedings the 12-th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing – Portoroz, Slovenia. – 2013. – С. 597-603.
  7. **Rastegaev, I.A.** Real time acoustic emission methodology in effective tribology testing / I.A. Rastegaev, D.L. Merson, A.Yu. Vinogradov //International Journal Microstructure and Materials Properties. – 2014. – Том 9, № 3/4/5. – С. 360-373.
  8. **Rastegaev, I.A.** Technique for the Determination of the Critical Points under Acoustic Emission Tribological Tests / I.A. Rastegaev, D.L. Merson, A.Yu. Vinogradov, A.V. Danyuk // Inorganic Materials. – 2017. – Том 53, № 15. – С. 1506–1512.
  9. **Rastegaev, I.A.** Using acoustic emission signal categorization for reconstruction of wear development timeline in tribosystems: Case studies and application examples / I.A. Rastegaev, D.L. Merson, A.V. Danyuk, M.A. Afanasyev, A. Vinogradov // Wear. – 2018. – Том 410-411. – С. 83-92.
  10. **Rastegaev, I.A.** A Time-Frequency based Approach for Acoustic Emission Assessment of Sliding Wear / I.A. Rastegaev, D.L. Merson, I.I. Rastegaeva, A.Yu. Vinogradov // Lubricants. – 2020. – Том 8, № 5. – 52.
  11. Растегаева, И.И. Сравнение основных частотно-временных преобразований спектрального анализа сигналов акустической эмиссии / И.И. Растегаева, **И.А. Растегаев**, Э.А. Аглетдинов, Д.Л. Мерсон // Frontier Materials and Technologies. – 2022. – 1. – С. 49-60.
  12. **Растегаев, И.А.** Анализ шумоподобных сигналов акустической эмиссии способами широкополосной фильтрации / И.А. Растегаев, А.В. Данюк, А.Ю. Виноградов и др.// Контроль. Диагностика. – 2014. – № 8. – С. 49-56.
  13. **Rastegaev, I.A.** Location of Noise-Like Sources of Acoustic Emissions Using the Spectral Similarity Method/ I.A. Rastegaev, A.V. Danyuk, A.Yu. Vinogradov et al.// Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2013. – Том 49, № 10. – С. 553–561.
  14. **Растегаев, И.А.** Применение лазерной сканирующей конфокальной микроскопии для оценки результатов трибологических испытаний / И.А. Растегаев, М.А. Афанасьев // Известия Самарского научного центра РАН. – 2015. – Том 17, Специальный выпуск № 1. – С. 187-190.

15. **Растегаев, И.А.** Применения метода акустической эмиссии для повышения эффективности обнаружения расслоения в металле сосудов, работающих в среде водородосодержащего газа / Растегаев И. А., Гомера В. П., Тюпин С. А. и др./ Контроль. Диагностика. – 2019. – 4. – С. 4-11.
16. **Rastegaev, I.A.** Monitoring of Fracture of Welded Joints in Hazardous Facilities by Acoustic Emission under Static and Cyclic Loadings / I.A. Rastegaev, M.L. Linderov, D.L. Merson, M.A. Afanasyev, A.V. Danyuk // Indian Journal of Science and Technology. – 2015. – Том 8, № 36. – 90555 (7p).
17. **Rastegaev, I.A.** Acoustic Emission Assessment of Impending Fracture in a Cyclically Loading Structural Steel / I. A. Rastegaev, A. V. Danyuk, M. A. Afanas'yev, D. L. Merson, F. Berto, A. Yu. Vinogradov // Metals. – 2016. – Том 6, № 11. – 266.
18. **Растегаев, И.А.** Сравнительный спектральный анализ шумоподобных акустических сигналов при мониторинге и диагностике промышленного оборудования / И.А. Растегаев, Д.Л. Мерсон, И.И. Растегаева, А.В. Чугунов, А.Ю. Виноградов // Контроль. Диагностика. – 2012. – №10. – С. 80-87
19. Растегаева, И.И. Оптимизация режимов обработки жидких сред в роторных устройствах на основе метода акустической эмиссии с системой обратной связи / И.И. Растегаева, **И.А. Растегаев**, А.А. Викарчук, Д.Л. и др.// Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. – 2012. – №5. – С. 25-31.
20. Danyuk, A.V. Advanced-Reliability Acoustic-Emission Transducers / A.V. Danyuk, **I.A. Rastegaev**, D.L. Merson, A.Yu. Vinogradov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2017. – Том 53. – № 1. – С. 32–38.
21. **Rastegaev, I.A.** Universal Waveguide for the Acoustic-Emission Evaluation of High-Temperature Industrial Objects / I.A. Rastegaev, D.L. Merson, A.V. Danyuk et al.// Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – Том 54. – № 3. – С.164-173.
22. **Rastegaev, I.A.** Enhancement of efficiency of tribological testing by using acoustic emission measurements / I.A. Rastegaev, D.L. Merson, A.Yu. Vinogradov // Journal of Acoustic Emission. – 2017. – №32. – С. s91-s97.
23. **Растегаев, И.А.** Глава 19: Новые подходы к оценке механизмов изнашивания в реальном времени по данным акустической эмиссии / И.А. Растегаев, Д.Л. Мерсон / Актуальные проблемы прочности: монография. В 2-х т. Бабич В.Е. [и др.]: под ред. В.В. Рубаника. – Витебск: УО «ВГТУ». – 2018. – Том 2. – С. 402-427.

Автореферат отпечатан с разрешения объединенного диссертационного совета 99.0.077.02 на базе ФГБУН «УдмФИЦ УрО РАН» и ФГБОУ ВО «ИжГТУ им. М.Т. Калашникова» (протокол № 10 от 14 октября 2022 г.)

Заказ № \_\_\_\_\_. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. печ. л. 2,3. Тираж 120 экз.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет».