

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант: д.ф.-м.н., профессор
Мерсон Дмитрий Львович

Тольятти - 2022

Оглавление

Введение	5
Глава 1. Анализ актуальности и проблем применения метода акустической эмиссии при контроле и мониторинге оборудования высокой шумности	
1.1. Анализ системы неразрушающего контроля и роли метода акустической эмиссии в ней.....	17
1.2. Основные положения применения метода акустической эмиссии при наличии шумов и помех.....	26
1.3. Анализ источников шумоподобной акустической эмиссии и их использование при диагностике промышленного оборудования.....	32
1.4. Анализ текущего технического уровня средств метода акустической эмиссии.....	42
1.4.1. Преобразователи акустической эмиссии.....	43
1.4.2. Предварительные усилители.....	44
1.4.3. Средства передачи данных.....	45
1.4.4. Аналого-цифровой преобразователь и блок обработки информации.....	45
1.5. Анализ проблем применения акустико-эмиссионного контроля на современном этапе его развития.....	51
Выводы по главе 1.....	56
Глава 2. Метод иерархического анализа шумоподобных сигналов и сигналов на уровне шума	
2.1. Теоретическое обоснование необходимости использования спектральных методов для обнаружения шумоподобных сигналов и сигналов на уровне шума.....	58
2.2. Теоретические основы обнаружения шумоподобных сигналов и сигналов на уровне шума в частотной области.....	64
2.3. Общий принцип метода иерархического анализа шумоподобных сигналов и сигналов на уровне шума.....	71
2.4. Обобщенный алгоритм метода иерархического анализа шумоподобных сигналов и сигналов на уровне шума.....	75
2.5. Методы получения опорных данных для реализации метода иерархического анализа акустической эмиссии при контроле промышленного оборудования.....	90
2.5.1. Метод получения опорных данных для детектирования критического состояния динамического оборудования.....	92
2.5.2. Метод получения опорных данных для детектирования критического состояния статического оборудования.....	98
Выводы по главе 2.....	106
Глава 3. Выбор вариантов реализации метода иерархического анализа шумоподобной акустической эмиссии и сигналов на уровне шума на основе анализа алгоритмов и параметров оценки акустической эмиссии	
3.1. Алгоритмы обнаружения сигналов акустической эмиссии.....	108
3.2. Алгоритмы частотно-временного преобразования акустической эмиссии.....	108
3.3. Алгоритмы фильтрации и шумоподавления акустической эмиссии.....	109

3.4.	Параметры оценки акустической эмиссии.....	113
3.5.	Алгоритмы локации источников акустической эмиссии.....	119
3.6.	Алгоритмы разделения источников акустической эмиссии на классы	120
3.7.	Критерии оценки класса опасности шумоподобных источников акустической эмиссии.....	125
3.7.1.	Кластерно-энергетический критерий.....	127
3.7.2.	Частотно-энергетический критерий.....	130
	Выводы по главе 3.....	132

Глава 4. Объекты и методы исследований

4.1.	Объекты исследований.....	133
4.1.1.	Тестовые акустико-эмиссионные сигналы с частотно-временными реперами.....	133
4.1.2.	Акустическая эмиссия при трении и изнашивании материалов.....	135
4.1.3.	Акустическая эмиссия сопровождающая развитие усталостной трещины.....	139
4.1.4.	Акустическая эмиссия при истечении жидкой и газовой среды через несплошность.....	144
4.1.5.	Акустическая эмиссия при течении жидкой среды со срывом вихрей.....	145
4.2.	Средства акустических исследований.....	148
4.2.1.	Состав аппаратуры, условия записи и обработки акустической эмиссии.....	148
4.2.2.	Основные технические характеристики акустико-эмиссионных систем.....	150
4.2.3.	Средства калибровки преобразователей акустической эмиссии.....	151
4.3.	Методы и алгоритмы обработки акустико-эмиссионных данных.....	152
4.3.1.	Алгоритмы шумопонижения и шумоподавления.....	152
4.3.2.	Алгоритмы классификации и кластеризации акустико-эмиссионных данных.....	153
4.3.3.	Модифицированный алгоритм локации источников акустической эмиссии.....	156
4.3.4.	Метод оценки вероятности обнаружения источников акустической эмиссии.....	159
4.3.5.	Другие методы исследований.....	161
	Выводы по главе 4.....	162

Глава 5. Исследование вариантов реализации метода иерархического анализа шумоподобной акустической эмиссии и сигналов на уровне шума

5.1.	Исследование вариантов частотно-временного преобразования.....	163
5.2.	Исследование алгоритмов шумопонижения и кластеризации.....	167
5.2.1.	Функции шумопонижения.....	167
5.2.2.	Опорные данные для проведения исследований.....	171
5.2.3.	Значения критериев (мер) сравнения выбранных методов кластеризации.....	178
5.2.4.	Результаты исследований вариантов применения алгоритмов шумопонижения и кластеризации.....	180
5.3.	Сравнение предложенных критериев оценки класса опасности для II уровня метода.....	189

5.3.1. Опорные данные для проведения исследований.....	189
5.3.2. Результаты исследований.....	197
Выводы по главе 5.....	204
Глава 6. Исследование возможности применения разработанного иерархического метода для решения практических задач	
6.1. Определение критических точек и восстановление хронологии разрушения узлов трения-скольжения по акустической эмиссии на примере лабораторных трибологических испытаний.....	206
6.2. Выявление усталостных трещин на оборудовании, работающем в циклическом режиме.....	216
6.3. Повышение точности локации шумоподобных источников акустической эмиссии на примере поиска утечки среды из резервуара.....	226
6.4. Организация обратной связи для контроля режима работы роторного оборудования на основе метода акустической эмиссии на примере поддержания режима работы кавитационной установки.....	232
Выводы по главе 6.....	245
Глава 7. Разработка средств для контроля промышленных объекта генерирующих шумоподобную акустическую эмиссию	
7.1. Экспериментальный образец интеллектуальной системы мониторинга.....	247
7.2. Преобразователь акустической эмиссии повышенной надежности.....	250
7.3. Универсальный акустический волновод.....	253
7.4. Универсальный учебно-исследовательский стенд изучения генерации и распространения сигналов АЭ.....	257
Выводы по главе 7.....	260
Заключение.....	261
Список определений, обозначений и сокращений.....	266
Список литературных источников.....	267
Приложения	
А. Результаты экспериментального сравнения частотно-временных преобразований.....	294
Б. Результаты исследования характеристик преобразователя акустической эмиссии повышенной надежности.....	297
В. Результаты исследования характеристик универсального акустического волновода.....	306
Г. Акты внедрения результатов работы.....	317
Д. Лист утверждения методики № МАЭК-СЦКДМ-001-2019.....	321
Е. Копии патентов на изобретения.....	322
Ж. Копия сертификата ЕАС RU № 0502058 соответствия преобразователя акустической эмиссии повышенной надежности требованиям ТР ТС 012/2011.....	327
И. Копия диплома и награды «Салона инноваций и стартапов 2020» РОНКТД.....	328

Введение

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. 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 акустической эмиссии, 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 акустической эмиссии. Высокий уровень шумов может приводить к сбою корректной работы детекторов сигналов акустической эмиссии, 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 акустической эмиссии 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 акустической эмиссии 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 объектах и их последствий. Таким образом, тема диссертации соответствует 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. С точки зрения метода акустической эмиссии это означает необходимость обнаружения сигналов на уровне шумов и/или возможность распознавания сигналов от нескольких одновременно действующих акустических источников. В данном ключе работы 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 акустической эмиссии. В первом направлении работали практически все основные школы метода акустической эмиссии. Однако при уровне сигнала, сопоставимым с шумом ($SNR < 6$ дБ), энергетический вклад первого настолько мал, что шумоподавление либо не возможно в принципе выполнить без потери сигнала, либо сигнал критически искажается. Поэтому параллельно силами научных школ, занимавшихся исследованием акустической эмиссии 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 акустической эмиссии. 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 акустическая

эмиссия содержит в себе диагностическую информацию, необходимую для оценки технического состояния различных объектов контроля проводились: Mba D., Boness R.J., McBride S.L., Mazal P., Hase A., Voinet M. и др. Согласно работам указанных научных школ и авторов и др. сделан вывод, что прогресс в извлечении «полезной» информации из шумоподобных сигналов следует ожидать при смещении акцента анализа характеристик акустической эмиссии 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 акустической эмиссии 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 акустической эмиссии, 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 акустической эмиссии 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 акустической эмиссии, 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 акустической эмиссии 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 акустической эмиссии (скачок трещины, искра, мартенситное превращение 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 акустической эмиссии конкретным физическим процессам и явлениям, многократной перепроверки результатов обнаружения источников шумоподобной акустической эмиссии, а также повышения надежности средств регистрации сигналов акустической эмиссии в условиях вибрации и колебании 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 акустической эмиссии 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 акустической эмиссии при действии источников трибологической и гидродинамической природы (типа).

3. Разработать алгоритмы обработки акустико-эмиссионных 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 акустико-эмиссионных данных.
6. Разработать технические решения, позволяющие повысить надежность применения средств регистрации сигналов акустической эмиссии 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 акустической эмиссии 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 акустической эмиссии на фоне шума за счет оценки подобия проявления их признаков на нескольких временных масштабах;

2. Впервые для принятия решений использован параллельный анализа акустической эмиссии 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 акустической эмиссии 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 акустической эмиссии 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 акустической эмиссии.

Основная практическая значимость работы заключается в следующем.

1. На основе предложенного трехуровневого спектрально-временного метода анализа шумоподобных сигналов акустической эмиссии разработаны: способ повышения точности локации шумоподобных источников акустической эмиссии (Патент № 2515423); способ диагностики динамического промышленного оборудования (Патент № 2684709); способ управления работой роторных перемешивающих устройств с обратной связью на основе метода акустической эмиссии; 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 акустической эмиссии при производственных и лабораторных испытаниях статически нагруженного оборудования разработан стенд, реализующий предложенный метод

имитации основных источников акустической эмиссии без повреждения объектов контроля (Патент № 2608969).

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

4. Для обеспечения возможности регистрации шумоподобной акустической эмиссии с промышленного оборудования в условиях вибрации, термоциклирования и высоких температур разработаны: преобразователь акустической эмиссии 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 акустической эмиссии, 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 акустической эмиссии 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 акустической эмиссии 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 акустической эмиссии 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 акустической эмиссии 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 акустико-эмиссионных 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 акустической эмиссии с размером источника инициирующего их (соответствует п. 3 паспорта специальности).

3. Автоматизированное алгоритмическое и программно-техническое решение для иерархический беспороговой обработки сигналов акустической эмиссии, 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 подбоя проявления диагностических акустико-эмиссионных 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 акустической эмиссии преобразователей, входящих в данную или смежную антенную группу 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 акустической эмиссии (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 (ММЕСЕ)» (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 акустической эмиссии. Разработанные технические решения имитации основных акустических источников реализованы в составе учебно-исследовательского стенда, который используется для обучения и повышения квалификации специалистов акустико-эмиссионного контроля. На основании разработанных аппаратных и алгоритмических решений изготовлен экспериментальный аппаратно-программный образец интеллектуальной акустико-эмиссионной 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 на публикации по теме диссертационной работы представлены в списке литературных источников, а копии патентов на изобретение – в приложении.

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.

Глава 1. Анализ актуальности и проблем применения метода акустической эмиссии при контроле и мониторинге оборудования высокой шумности

1.1. Анализ системы неразрушающего контроля и роли метода акустической эмиссии в ней

В системе неразрушающего контроля (НК) метод акустической эмиссии (АЭ) является одним из молодых методов НК, но имеющий давнюю историю. Это связано с тем, что метод основан на явлении, которое известно человечеству с незапамятных времен, как треск ненадежного льда/моста под ногами, хруст сучьев под крадущимся хищником, шум кипящей воды или бурлящего водопада, рокот вулкана, землетрясение, треск олова и т.д. Однако до начала XX века специальных исследований по изучению причин возникновения акустического излучения при названных очевидных и регистрируемых «невооруженным ухом» явлениях не проводилось и воспринималось, и использовалось на уровне рефлексов и интуиции. Как физическое явление АЭ начало изучаться и фиксироваться человечеством с 1916 г., когда Я. Чохральский (J. Czochralski) впервые научно описал и зафиксировал акустическое излучение, возникающее при разрушении цинка и олова [1, 2], поэтому сначала АЭ представлялась, как явление, сопутствующее перестройке внутренней структуры и разрушению материалов [3]. Сегодня явление АЭ трактуется гораздо шире и представляет собой процесс генерации или излучения твердым, жидким или газообразным веществом акустических (упругих) волн под воздействием нагрузки или влияния других факторов [4-6], т.е. явление, сопутствующее множеству физических процессов.

Таким образом, если брать за отсчет 1916г. явление АЭ научно изучается человечеством уже более 100 лет, но в системе НК оно начало использоваться сравнительно недавно, примерно с 70-х годов XX века. Необходимо отметить, что хотя за прошедшее время и выполнено немало работ, проясняющих природу явления АЭ, полное понимание всех его проявлений отсутствует. В качестве ключевых моментов, повлиявших на становление метода в системе НК, можно выделить следующие этапы [1-3, 6, 7].

В 1936г. для регистрации АЭ Ф. Фёрстер (F. Förster) и Э. Шайл (E. Shail) применили электродинамический преобразователь, а в 1948 г У.П. Мэйсон (W.P. Mason), Х.Д. МакСкимин (H.J. McSkimin) и В. Шокли (W. Shockley) – впервые кварцевый кристалл, хотя пьезоэффект был открыт за 68 лет до этого.

В конце 40-х и начале 50-х годов XX века Д. Кайзер (J. Kaiser) провел крупномасштабные исследования АЭ сопровождающей разрушение различных

материалов, которые обобщил в 1953 г. описав ключевой эффект невоспроизводимости акустического излучения при повторном нагружении материалов до достижения нагрузки предыдущего цикла при которой параметры АЭ восстанавливаются скачкообразно (эффект, называемый именем Кайзера или акустико-эмиссионным эффектом памяти). Д. Кайзер (J. Kaiser) также ввел классификацию АЭ по форме сигналов, разделив АЭ на непрерывную (в виде шума) и импульсную или дискретную (в виде различных сигналов).

В 1960 г. К.Э. Тэтро (C.A. Tatro) инициировал вторую волну изучения АЭ внедрив двунаправленную программу проведения АЭ исследований: 1) изучение физической природы АЭ; 2) применение полученных знаний для АЭ оценки качества конструкционных материалов.

В 1964 г. А.Т. Грин (A.T. Green) с коллегами опубликовал данные гидравлических испытаний корпусов ракет для американского морского флота. В которых они впервые комплексно показали возможности метода и, по сути, заложили основы выполнения АЭ контроля. Кроме этого впервые применили в методе АЭ триангуляционную локацию источников, собрали АЭ систему на базе аналогового компьютера и создали передвижную АЭ лабораторию на автомобильном шасси.

В 1967 г. Д.К. Спаннер (J.C. Spanner) и А.Т. Грин впервые собрали рабочую группу по АЭ (Acoustic Emission Working Group) для консолидации разработок, обмена полученными результатами и обсуждения АЭ стандартов.

В 1968 г. Х.Л. Данеган (H. L. Dunegan) с коллегами получил вторую ключевую для НК (наряду с эффектом Кайзера) зависимость суммарного счета АЭ от величины коэффициента интенсивности напряжений в материале при росте в нем трещины. Данная работа важна еще и тем, что впервые была установлена связь между оценочными параметрами линейной механики разрушения и АЭ. Тем самым положив научные основы для прогнозирования разрушения материалов по параметрам АЭ.

В 1969 г. Х.Л. Данеган организовал первую коммерческую компанию по производству промышленной АЭ аппаратуры для проведения НК технологического оборудования, в которой впервые был использован частотный фильтр. В том же 1969 г. С.Е. Фитч (S.E. Fitch) с коллегами впервые выполнил детальный анализ акустического тракта пластины с выработкой технических рекомендаций по улучшению методов обнаружения АЭ источников.

В 1972 г. И. Радон (I.C. Radon) и А. Поллок (A.A. Pollock) описали корреляционную взаимосвязь амплитуды АЭ с длиной скачка трещины, а в 1973 г. И. Палмер (I.G. Palmer)

и П. Хилд (P.T. Heald) создали модель связывающую суммарный счет АЭ с приложенным механическим напряжением и длиной трещины. Эти первые и последующие подобные работы по изучению распределения амплитуд сигналов АЭ при разрушении различных материалов показали, что при АЭ неразрушающем контроле работоспособен и применим закон Б. Гутенберга (B. Gutenberg) и Ч.Ф. Рихтера (C.F. Richter) предложенный в 1944 г. в сейсмологии. Указанный закон описывает степенную кумулятивную зависимость амплитуд сигналов АЭ с числом повреждении материала вызвавших их. Также оказалось, что при статическом разрушении металлических материалов данный закон позволяет разделить АЭ от пластической деформации и процессов трещинообразования, что легло в основу определения порога трещинообразования необходимого для настройки амплитудного критерия оценки степени опасности развивающихся дефектов [3, 6, 8, 9]. В это же время Х.Л. Данеган и А.Т. Грин впервые обобщили факторы состава, структуры и термомеханической обработки материалов влияющих на величину оценочных параметров и характер АЭ [1].

В 1974 г. в США начали проводиться курсы и занятия по применению метода АЭ при НК. В 1976 г. Су Нельсон (Nelson H. Hsu) изобрел имитатор АЭ в виде излома графитового стрежня, являющийся до сих пор простым, надежным и эффективным средством проверки чувствительности АЭ аппаратуры [6] и положенный в основу ряда стандартов применения метода АЭ [10, 11 и др.].

В 1977 г. Т.Д. Фоулер (T.J. Fowler) описал невыполнение эффекта Кайзера в композитах с введением коэффициента Фелисити (названного им в честь своей дочери Felicity), представляющим собой отношение величины нагрузки, при которой произошло нарушение эффекта Кайзера к максимальной испытательной нагрузке в предыдущем цикле нагружения. Что позже было спроецировано для описания степени опасности развивающегося дефекта в любых материалах и также легло в основу метода АЭ.

История исследования АЭ и ее применение при НК материалов и изделий в нашей стране началась с заметным отставанием, однако мировой опыт был быстро подхвачен. Целенаправленные исследования явления АЭ были инициированы В.А. Грешниковым в 1968 г в ВНИИФТРИ г.Хабаровск (позднее НПО «Дальстандарт») [12, 13]. Помимо ВНИИФТРИ пионерами (1970 – 1972 гг.) в исследовании явления АЭ были НПО «ЦНИИТМАШ» г. Москва; ВНИИНК г. Кишинев (позднее НПО «Волна»); НИИТМ г. Москва; МИФИ г. Москва; Ростовский-на-Дону государственный университет; Институт проблем прочности г. Киев и др. [2, 7]. В НПО «ЦНИИТМАШ» начались работы в области применения метода АЭ для контроля оборудования опасных производственных

объектов (ОПО), которые позже были продолжены в ИркутскНИИХИММАШ. В НИИТМ прорабатывались вопросы АЭ контроля изделий космической техники. В Институт проблем прочности исследовали АЭ при разрушении различных материалов, как и в МИФИ, где помимо этого проведен большой цикл исследования шумоподобной АЭ возникающей при коррозии, трении и изнашивании материалов. В Ростовском-на-Дону государственном университете (ныне Южный федеральный университет) выполнялись разработки преобразователей АЭ и методик компенсации потерь и искажения АЭ информации. ВНИИНК совместно с ИЭА им. И.В. Курчатова был разработан широкий спектр АЭ приборов и систем для контроля атомных электростанций, а их специалистами в г. Москва позднее были образованы ООО НПФ Диатон и ООО Диапак, которые занимаются разработкой приборов и методик АЭ контроля и мониторинга промышленного оборудования по настоящее время.

Работа обозначенных выше и других институтов, и организаций позволила уже к 1972 г. адаптировать несколько измерительных средств для регистрации и визуализации АЭ. Первый диагностический АЭ-прибор появился в 1973 г., а к 1975 г. уже несколько видов многоканальных АЭ-систем [3, 7, 12, 13]. При этом к 1973 г. было полностью проработано метрологическое обеспечение АЭ аппаратуры [13]. Первая книга по АЭ Грешникова В.А. и Дробота Ю.В. [3] была издана в 1976 г, а уже в 1979 г. вышел первый стандарт по АЭ методу [12, 13]. Практическое применение метода на атомных электростанциях началось ближе к концу 70-х годов XX века, а для обеспечения безопасности в промышленности с 1984 года [2, 7]. Первыми полноценными изданиями в направлении изучения и диагностического применения именно шумоподобных источников АЭ являются книги: Свиреденка А.И., Мышкина Н.К., Калмыковой Т.Ф., Холодилова О.В. по АЭ трибодиагностике вышедшая в 1987 г. [14] и Дробота Ю.Б., Грешникова В.А., Бачегова В.Н. по контактному течеисканию вышедшая в 1989 г. [15]. Здесь также следует особо выделить издание по применению шумоподобной АЭ для оценки условий изнашивания узлов трения Баранова В.М., Кудрявцева Е.М., Сарычева Г.А., Щавелина В.М. вышедшее в 1998г. [16], которое в 2007 г. было переиздано на английском языке и до сих пор остается учебником и настольной книгой по АЭ трибодиагностике во всем мире.

Однако это было началом, т.к. по мере изучения АЭ и применения основанного на ней метода в системе НК, приблизительно к 1975 году [16] пришло понимание того, что интерпретация сигналов при промышленном АЭ контроле не такая простая задача, как казалась на первый взгляд и требует прояснения еще множества вопросов. В связи с этим

в Советском Союзе, а затем в России начали образовываться и развиваться научные группы, решающие какие-то отдельные вопросы, но со временем группы превратились в мощные научные школы.

Помимо названных выше в качестве основных научных школ в области исследования явления АЭ при разрушении конструкционных материалов можно выделить следующие: ИМЕТ им. А.А. Байкова г.Москва; ИЭА им. И.В. Курчатова г.Москва (сегодня НИЦ Курчатровский институт); ИЭС им. Е.О. Патона г.Киев; ФТИ им. А.Ф. Иоффе г.Санкт-Петербург; ФМИ им. Г.В. Карпенко г.Львов; Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого г.Гомель; Ижевский Государственный технический университет; ФГУП СибНИА им. С.А. Чаплыгина совместно с Сибирским государственным университетом путей сообщения г.Новосибирск; Алтайский государственный университет г.Барнаул; НИТУ МИСиС г.Москва; МГТУ им. Н.Э. Баумана г.Москва; НИИИН МНПО «Спектр» г.Москва; Национальный исследовательский Томский политехнический университет совместно с Томским научным центром СО РАН; Тульский государственный университет; Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет; Санкт-Петербургский государственный университет; Тольяттинский государственный университет. В области применения метода АЭ в качестве средства НК опасных производственных объектов среди основных научных школ можно выделить следующие: ОАО «Оргэнергонефть» г.Самара; НПО «ВНИКТИ нефтехимоборудование» г.Волгоград; Всесоюзный теплотехнический институт г.Москва (сегодня Всероссийский теплотехнический НИИ); ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова г.Санкт-Петербург (сегодня ФГУП «Крыловский государственный научный центр»); ЗАО ГИАП-ДИСТЦентр г.Москва; Военная академия РВСН им. Петра Великого г.Балашиха; ООО ИнтерЮнис-ИТ г.Москва; НПО Алькор г.Дзержинск; ООО Стратегия-НК г.Екатеринбург; НПЦ Динамика г.Омск.

Благодаря обозначенным и др. научным школам, в настоящее время, Россия находится на передовых позициях, как в направлении изучения физической природы явления АЭ, так и в направлении применения метода для решения производственных задач [17].

Глобально, актуальность дальнейшего развития метода АЭ диктуется тем, что он является уникальным и перспективным, т.к. до сих пор остается единственным методом в системе НК, который позволяет классифицировать дефекты не по их размерам, а по степени их опасности для эксплуатации материала, узла или конструкции в целом. Актуальность основных направлений развития внутри самого метода можно оценить по

данным таблицы 1.1 в которую сведена статистика мировых публикаций по АЭ исследованиям с 2005 по 2011 год [17].

Таблица 1.1 - Актуальность направлений развития метода АЭ по литературным данным

№ п/п	Преимущественное направление исследований	Количество публикаций по [17], %	Актуальность проблемы по [6], %	Степень решения проблемы по [6], %
1	Изучение АЭ при разрушении материалов (источники АЭ и их оценка)	29,4	100	50
2	Разработка алгоритмов обработки и анализа АЭ данных (с выделением АЭ из шумов)	15,2	90	50
3	Применение АЭ в строительстве и геологии	14,4	-	-
4	Применение АЭ при мониторинге и диагностике промышленного оборудования	12,2	-	-
5	Распространение АЭ в конструкциях (проблема АЭ канала)	7,0	80	70
6	Разработка и совершенствование АЭ приборов и преобразователей	5,2	100	90
7	Применение АЭ в машиностроении	1,3	-	-
8	Применение АЭ в медицине	0,7	-	-
9	Вопросы стандартизации метода АЭ	0,4	40	80
10	Применение АЭ в других направлениях	14,2	-	-

Сравнение наиболее востребованных направлений исследований, приведенных в Таблице 1.1, с выделенными более 30-ти лет назад В.И. Ивановым проблемами в области АЭ [18], показывает их полное совпадение по ключевым вопросам. Нерешенность этих проблем до настоящего времени остается высокой и по оценкам В.И. Иванова и В.А. Барат [6] составляет величины, приведенные в таблице 1.1. Исходя из этих оценок можно заключить, что на сегодняшний день актуальными остаются следующие основные задачи: изучение АЭ при разрушении материалов, разработки алгоритмов обработки и анализа АЭ данных и использование полученных знаний при мониторинге и диагностике промышленного оборудования (что в совокупности по таблице 1.1 составляет 56,8 % от общего числа публикаций). При этом количество публикаций по алгоритмам обработки и анализа АЭ данных (развитие программной части) в три раза превышает количество публикаций направленных на совершенствование аппаратных средств метода, что коррелирует с величинами степени решения соответствующих проблем. Также таблица 1.1 показывает, что метод АЭ уже сформировался, как самостоятельное научно-

техническое направление развивающееся на стыке многих современных наук и смежных специальностей (физика, математика, радиоэлектроника, автоматика, микропроцессорная и вычислительная техника и др.), применяется в широком спектре отраслей (медицина, строительство, геология, нефтехимическая промышленность, мостостроение и т.д.) и на всех основных этапах жизненного цикла изделий (при их производстве, эксплуатации, ремонте, а также для мониторинга протекания технологических процессов и реакций). Между тем метод АЭ все еще остается на стадии опытно-промышленной апробации, что связано с отсутствием полного понимания физики, как самих явлений (источников), так и сопутствующих эффектов (в том числе генерация АЭ), а, следовательно, нерешенности многих ключевых вопросов его применения. Снятие существующих в методе АЭ ограничений требует привлечения различных областей знаний, что и показывает таблица 1.1. Это же демонстрирует, и карта областей знаний, относящаяся к текущему применению АЭ в системе НК, которая была составлена на основе анализа литературных источников и представлена на рисунке 1.1.

Преимущественное направление применения метода АЭ в области НК – это обеспечение безопасности эксплуатации оборудования опасных производственных объектов (ОПО) [18], поскольку они находятся под надзором Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в соответствии с Федеральным законом № 116-ФЗ. В неподконтрольных надзорными органами сферах применение метода АЭ незначительное и всецело определяется только экономической эффективностью (прибылью), которую можно извлечь при применении средств АЭ контроля. Однако в последнее время в данном направлении также отмечается рост АЭ исследований.

Принципиальная схема этапов технического диагностирования оборудования ОПО для обеспечения их безопасной эксплуатации и существующие возможности применения метода АЭ на них, представлены на рисунке 1.2 [A2], где приняты следующие сокращения: ТД – техническое диагностирование; НК – неразрушающий контроль; НТД – научно-техническая документация; ВИК – визуально-измерительный контроль; ТК – тепловой контроль; ПВК – контроль проникающими веществами; УЗК – ультразвуковой контроль; УЗТ – ультразвуковая толщинометрия; РК – радиационный контроль; Тв – измерение твердости.

Из рисунка 1.2 видны очевидные успехи в развитии метода АЭ для целей НК и ТД. Однако система НК и ТД постоянно развивается и с марта 2013 г. принят Федеральный закон № 22-ФЗ который направлен на кардинальное изменение системы обеспечения

безопасности ОПО, где впервые в российской законодательной практике введена количественная оценка промышленной безопасности в виде величины «риска аварии».

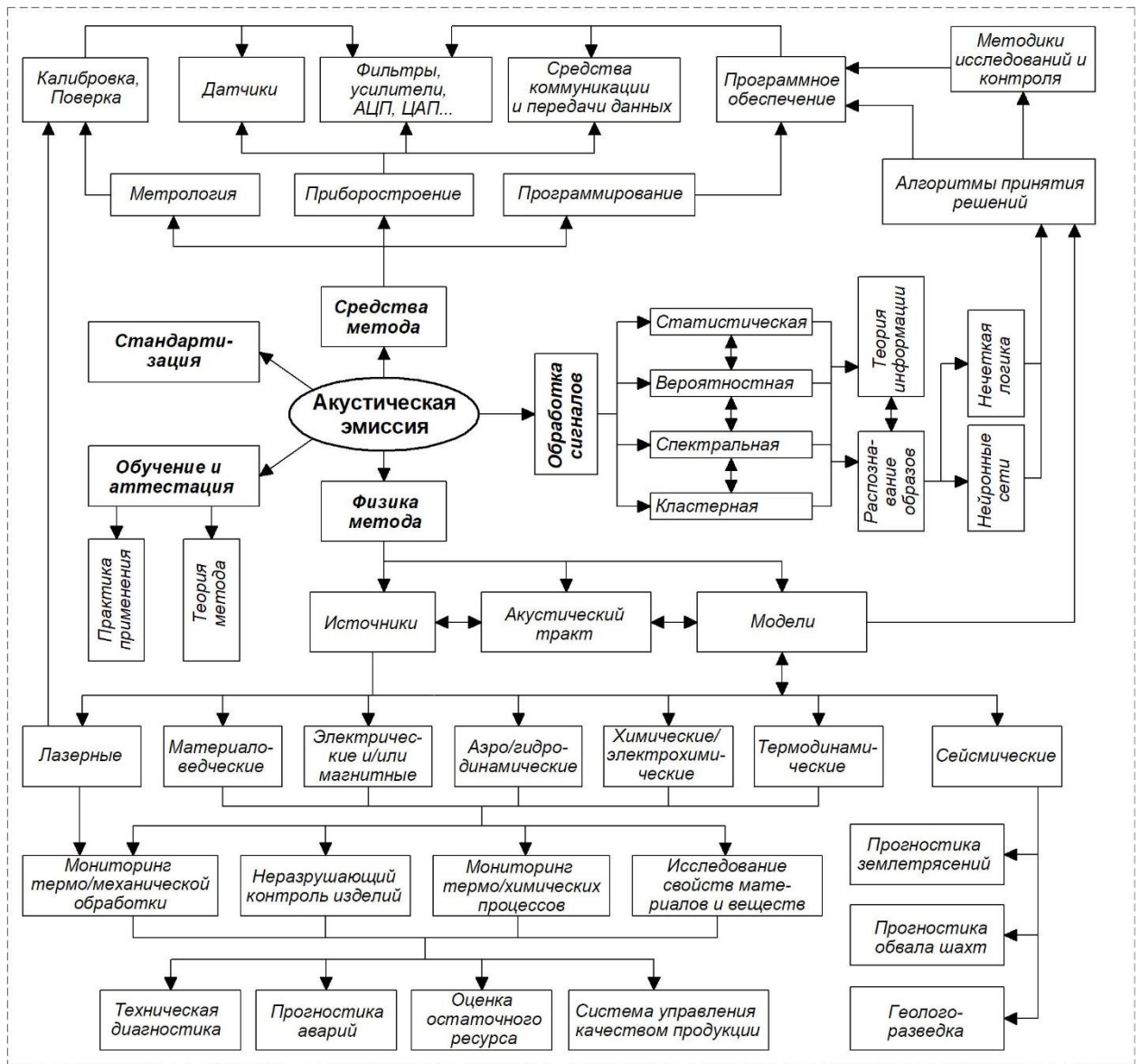


Рисунок 1.1 – Текущая карта областей знаний, относящихся к применению метода АЭ в системе НК ОПО, составленная на основе анализа литературных источников.

Анализируя данный подход можно отметить, что обозначенная концепция управления техногенными рисками позволяет осуществлять не только планирование и реализацию мер по снижению вероятности аварии, но и стоимости технического обслуживания за счет перехода от традиционной системы планово–профилактического обслуживания к обслуживанию ОПО по фактическому их техническому состоянию. Однако в концепция управления техногенными рисками существует некоторая неопределённость. Дело в том, что процент общемировых инцидентов и аварий, как

действующих, так и новых ОПО далеко не всегда удаётся адекватно оценить. Это связано с тем, что в основу существующей оценки риска аварии положен функционал в виде произведения вероятности (частоты) отказа оборудования на величину максимально возможного ущерба при данном отказе [19]. Следовательно, если, например, у какого-то вида ОПО не было аварий (или они не учтены), то риск наступления аварийного состояния автоматически равняется нулю, а это, конечно, не так. Но даже в случае наличия статистики аварий оборудования, динамика аварийности представляется зависимостью средней интенсивности аварий за предшествующие несколько (обычно 5) лет. А интенсивность (частота) аварий за год определяется с большим разбросом величины, которая в пределах доверительного интервала уровня значимости 0,95 достигает значений используемой величины интенсивности. Все это приводит к определению величины риска с недопустимой для применения погрешностью. В связи с этим, в настоящее время развивается новое направление развития концепции управления техногенными рисками не на основе статистики аварий, а на основе результатов оценки фактического технического состояния оборудования с применением средств НК в общем и метода АЭ в частности [20, 21]. Последнее накладывает повышенные требования к качеству результатов, получаемых при НК ОПО [21].

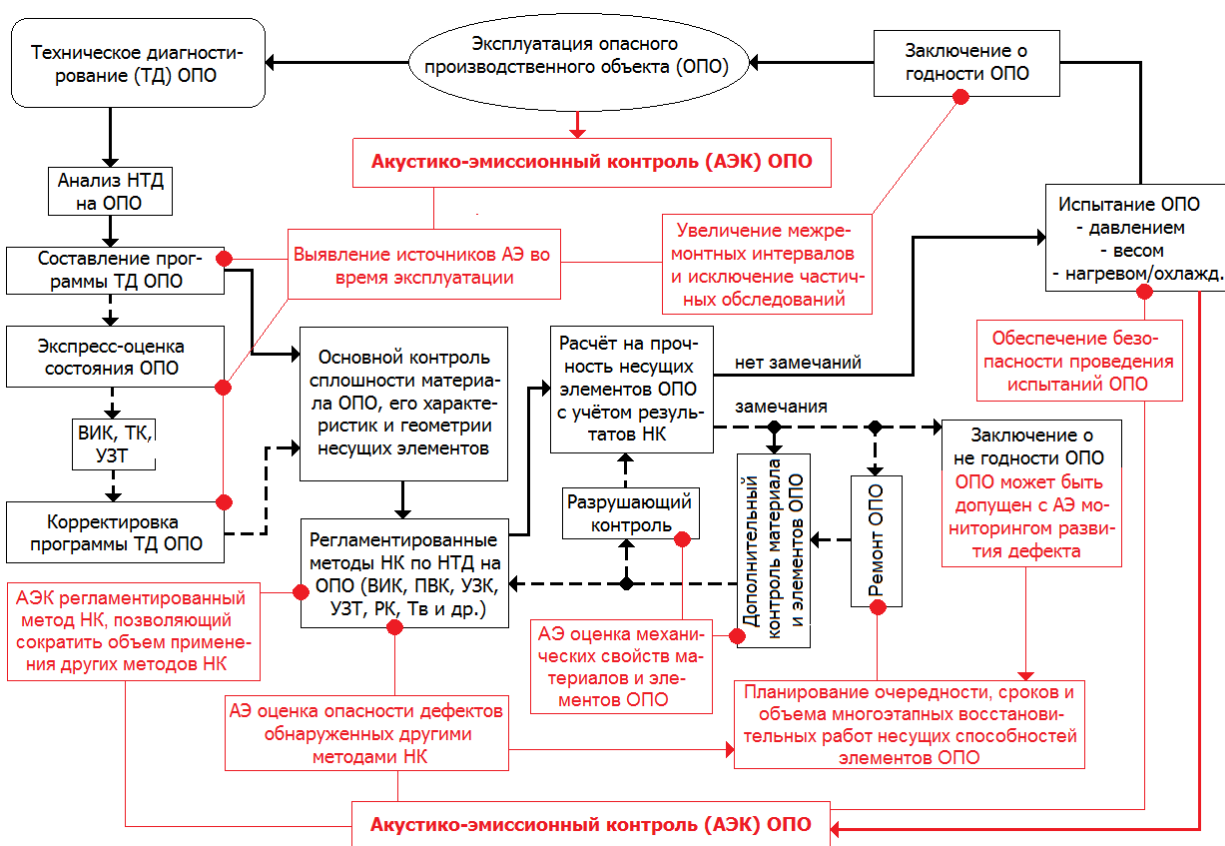


Рисунок 1.2. – Принципиальная схема направлений современного применения метода АЭ при оценке технического состояния оборудования ОПО [А2].

Для метода АЭ под повышением качества результатов, в основном, понимается раннее обнаружение источника АЭ с минимальной вероятностью ошибки и идентификация его вида, что невозможно достичь анализируя только импульсную АЭ без учета непрерывной (шумоподобной) АЭ. Следовательно, разработка способов обнаружения сигналов АЭ на уровне шума и повышение достоверности получаемых методом АЭ результатов является не только актуальной, но и объективно необходимой на сегодня задачей, на решение которой и направлена настоящая работа.

1.2. Основные положения применения метода акустической эмиссии при наличии шумов и помех

Как уже отмечалось в п. 1.1. акустико-эмиссионный метод неразрушающего контроля (АЭК) основан на явлении акустической эмиссии (АЭ). Которое сегодня, благодаря накопленному экспериментальному и теоретическому материалу формулируется, как явление излучения объектом контроля (испытаний) упругих (акустических) волн под воздействием нагрузки или влияния других факторов [4, 5]. При этом под источником АЭ понимается область объекта контроля (область локализации), в пределах которой происходит преобразование какого-либо вида энергии в акустическую под действием физических и/или химических процессов [4].

Также уже отмечалось, что со времен Д. Кайзера (50-е годы XX-века) и до сих пор [4] АЭ от источников разделяют на импульсную (дискретную) и непрерывную. При этом многими авторами показано, что вид АЭ формирует когерентность действия элементарных источников, генерирующих ее [16, 22]. Если уровень акустического излучения (высвобождаемой энергии) генерируемый несколькими источниками мал, но они когерентны или источник локальный и представляет сильно неравновесную (напряженную) область объекта при воздействии на которую происходит резкая диссипация всей запасенной энергии, то в этом случае АЭ состоит из неперекрывающихся и хорошо различимых высокоэнергичных импульсов и называется дискретной или импульсной. Если действует множество некогерентных элементарных источников или когерентный источник АЭ малой мощности (на уровне окружающего шума), то АЭ от них не имеет четко различимой формы, воспринимается как непрерывный процесс и называется непрерывной или шумоподобной. Известно [6, 16 и др.], что источниками импульсной АЭ являются, например: пластическая деформация двойникованием; скачок хрупкой трещины; мартенситное превращение;

перемагничивание материала; электрический разряд и др. Примером источников непрерывной (шумоподобной) АЭ являются: пластическая деформации дислокационным скольжением; трение и изнашивание материалов; аэро- и гидродинамические процессы; изменение веществом агрегатного состояния; коррозия и др. (что подробнее будет рассматриваться далее в п. 1.3).

При этом непрерывная (шумоподобная) АЭ, обладает не менее важной, чем импульсная, диагностической информацией, поскольку точно также несет сведения об источнике, хотя в общем виде может представлять собой шум или помеху (например, некомфортный человеку шум в виде скрипа вращения колеса с диагностической точки зрения является признаком дефекта в виде отсутствия смазки на оси или в подшипнике колеса). Как известно, под помехой понимаются сигналы, генерируемые источниками, задача выявления которых, не входит в цели применения метода АЭ [4]. С шумом все сложнее, т.к. это понятие достаточно относительное. Под шумом часто понимают любое бессистемное сочетание неблагоприятных (мешающих) колебаний различной амплитуды и частоты присутствующее в любом сигнале и скрывающее его полезную составляющую [23, 24]. Применяется понятие шума в основном для описания окружающего фона без уточнения источников, инициирующих его. Математически шум определяется статистическими параметрами, описывающими его спектр и автокорреляционную функцию поэтому шум разделяют на широкополосный и тональный. Широкополосный шум по аналогии со световым спектром разделяют на: белый, серый и цветной (красный или броуновский, розовый или фликкерный, голубой или черенковский и др. [24]). Тональным шум считается, если одна из третьоктавных полос частот его спектра превышает все остальные на некоторую установленную величину. Для метода АЭ нормативно эта величина не регламентируется, но если АЭ записывается в звуковом диапазоне, то действует норма шумометрии равная 10 дБ. Также важной характеристикой шума является его стационарность (постоянство средних параметров: интенсивности (мощности), распределения интенсивности по спектру (спектральная плотность), автокорреляционной функции). Шум, длящийся короткие промежутки времени, т.е. имеющий перепад указанных средних параметров за некоторый интервал измерения называют нестационарным. Он в основном и встречается в практике промышленного НК.

Таким образом, под шумоподобной АЭ понимается не шум, а сигнал с широким спектром, являющийся результатом суперпозиции волн, генерируемых несколькими (многочисленными) исследуемыми (основными) и не подлежащие исследованию (второстепенными) источниками, наложенных на окружающий фон. При этом энергия

сигнала от исследуемого источника мала по сравнению с некоторым мешающим процессом (фоном, помехой) и сосредоточена в одной или распределена по различным областям частотного диапазона, что приводит к трудностям выделения сигнала во временной и спектральной областях (о чем подробнее еще будет говориться далее в Главе 2 и 3).

На современном этапе развития метода АЭ есть четкое понимание того, что разделение АЭ на указанные выше типы весьма условно, так как [6, 16, 18, 26]: (i) дискретную АЭ могут составлять сигналы малой амплитуды, а шумоподобная, наоборот, может быть высокоэнергетичной; (ii) разделение АЭ на дискретную и шумоподобную всецело определяется скоростными возможностями (разрешающей способностью) аппаратно-программных средств регистрации и анализа АЭ данных.

Кроме этого, при наблюдении шумоподобной АЭ на промышленных объектах контроля, особенно сложной геометрической формы или многоэлементной составной конструкции, источники следует разделять и по отношению к элементу объекта контроля, с которого фиксируется АЭ, которые разделяться на [А1]: внутренние, поверхностные и внешние (рисунок 1.3).

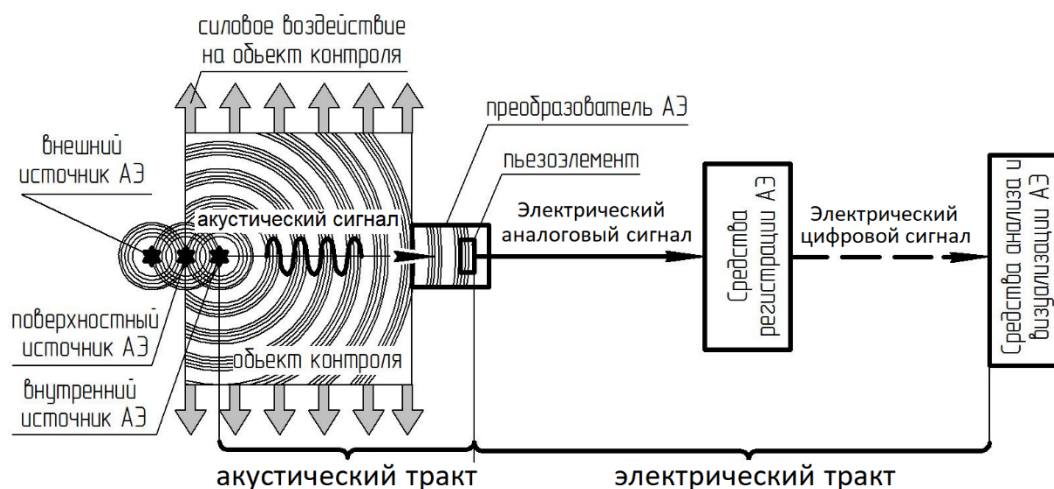


Рисунок 1.3 – Принципиальная схема реализации метода акустической эмиссии.

Внутренние источники – это пластическая деформация, фазовые превращения, трещинообразование и др. явления, происходящие в объеме материала объекта, с которого регистрируется АЭ. Поверхностные источники – трение и износ, коррозия, воздействие лазером и др. явления, приводящие к повреждению поверхности объекта с которого регистрируется АЭ при прямом воздействии на него извне. Внешние источники АЭ – это источники (внутренние или внешние) действующие в стороннем объекте

непосредственно с которого не регистрируется АЭ, но который акустически связан через жидкую или твердую среду, с объектом с которого происходит запись АЭ (при трении это схемы записи АЭ работы подшипника через корпус механизма, зубчатой передачи через масло и корпус редуктора и т.д.).

Учитывая, что источниками АЭ являются практически все известные физико-химические процессы [6, 16 и др.], а АЭ волны неся информацию об источниках распространяются на большие расстояния, имеем принципиальную и физически обоснованную возможность решения чрезвычайно важной обратной задачи: путем расшифровки зарегистрированной АЭ-информации судить о происходящих в материалах и веществах всевозможных процессах. Эта заманчивая перспектива и объясняет большое многообразие попыток применения АЭ метода в различных областях науки и техники. Однако явление АЭ и причины ее возникновения оказались более сложными, чем изначально представлялось. По-видимому, наиболее продуктивным периодом развития метода АЭ являются 70-е годы XX века. Поскольку, как видно из п. 1.1, именно тогда была осознана проблема сложности анализа и интерпретации АЭ данных.

При анализе АЭ данных различают акустический и электрический сигнал [4]. Под акустическим сигналом понимают генерируемое источником АЭ акустическое поле, параметры которого несут информацию об источнике и объекте испытаний. При взаимодействии с пьезоэлементом регистрирующего датчика акустический сигнал преобразуется в аналоговый электрический, который представляет собой электрическое напряжение или ток, свидетельствующие о наличии АЭ. После прохождения аналого-цифрового преобразователя аналоговый электрический сигнал становится цифровым. Путь, который проходит акустический сигнал от источника до преобразователя АЭ, называют акустическим трактом или каналом, а путь электрического сигнала от преобразователя АЭ и далее – электрическим трактом / каналом (рисунок 1.3). В связи с высоким развитием и быстродействием современной цифровой техники в настоящее время основная часть процедур обработки сигналов АЭ переложена на программные средства АЭ систем, поэтому в анализе АЭ данных используются двойники электрических сигналов (цифровые сигналы) или их параметрические образы. При этом, как было сказано в п. 1.1 и будет показано далее аппаратная часть уже устоялась и мало меняется, а основное направление развития метода идет по совершенствованию программно-алгоритмических решений задач анализа и обработки АЭ данных.

Метод АЭ, как и любой метод НК, обладает как существенными преимуществами перед другими методами НК, так и серьезными недостатками, сдерживающими его

развитие и широкое внедрение. Однако здесь для выделения и постановки решаемой в работе проблемы рассмотрим преимущества применения метода АЭ в противопоставлении с ограничениями, связанными с ними. Результаты сравнения представлены в таблице 1.2 [А1]. Из которой видно, что некоторые преимущества метода оборачиваются существенными недостатками, которые подробнее рассматриваются далее в п. 1.5, а здесь забегая вперед лишь обратим внимание на наиболее существенные для постановки задач настоящей работы. Первым наиболее критическим из них является высокая чувствительность метода с одной стороны, а с другой стороны параллельно регистрируется весь шум такого же амплитудного уровня, что может не позволить выявить полезный сигнал. Вторым – является интегральность метода с одной стороны (АЭК реализуем с применением даже одного преобразователя АЭ), а с другой – при одновременном действии нескольких источников АЭ синергетический результат приводит к трудностям разделения сигналов АЭ, связанных с конкретными источниками, соответственно, трудности решения обратной, наиболее важной для практики задачи: установление в реальном времени по сигналам АЭ их источников. Третий недостаток вытекает из первых двух, а именно: из-за сложности выделения полезных сигналов АЭ и трудности идентификации типа источника – высока неопределенность результатов АЭК, следовательно, обязательно требуется их перепроверка дополнительными методами НК. При этом многими авторами показано, что зачастую пропуск дефекта связан либо с более низкой по сравнению с АЭК чувствительностью методов НК используемых для подтверждения его результатов, либо с тем, что по нормам дополнительных методов НК АЭ-активный дефект может быть допустим [например, 26].

Таблица 1.2 – Преимущества и ограничения метода АЭ

Преимущества применения метода АЭ	Ограничения применения метода АЭ связанные с его преимуществом
Высокая чувствительность метода	Значительное влияние мешающих факторов, особенно шумов. Требуются специальные алгоритмы фильтрации и распознавания (детектирования) сигналов АЭ в общем потоке данных
Возможность определения координат (локация) источника АЭ с большой точностью в одно- (линия), двух- (плоскость) и трех- (тело) мерном пространстве	Область контроля ограничивается затуханием и искажением акустических сигналов при распространении. Геометрия и материал объекта контроля существенно влияет на возможность и погрешность локации АЭ источников

Преимущества применения метода АЭ	Ограничения применения метода АЭ связанные с его преимуществом
Возможность обнаруживать и следить за поведением только развивающихся дефектов, т.е. представляющих наибольшую опасность для объекта контроля. Позволяет подтвердить опасность дефекта, выявленного другими методами НК	Нечувствителен к неразвивающимся (статическим) дефектам даже критических (недопустимых) размеров. Нечувствителен к низкоэнергетичным процессам, развивающихся с малой скоростью
Метод АЭ <i>единственный метод НК</i> , позволяющий классифицировать источники по степени опасности для эксплуатации объекта контроля	Не позволяет оценить дефекты/источники по форме, размерам и ориентации в объекте контроля. При действии нескольких источников возникает проблема разделения сигналов от каждого источника
Возможность дистанционного контроля большой площади объекта неподвижно расположенным преобразователем – без сканирования. Позволяет обеспечить безопасность проведения испытаний объекта. Метод АЭ – является пассивным методом, т.е. не имеет источников излучения, никак не воздействует на объект контроля и, следовательно, не изменяет его свойства	Необходимость в обязательном порядке общего или локального нагружения объекта контроля малошумящим способом (давление, вес, температура). Требуется разработка дополнительных мер по безопасному проведению испытаний объекта, т.к. существует вероятность его разрушения при нагружении/испытании
Относительная простота использования метода, заключающаяся в установке датчиков, записи и оценке АЭ	Сложность интерпретации АЭ данных, установлении вида источников и оценки их класса опасности для объекта контроля
Возможность применения для контроля изделий, изготовленных из разнообразных материалов (как однородных, так и неоднородных). Положение и ориентация объекта контроля и дефектов не влияют на их обнаружение. Возможен контроль недоступных и труднодоступных объектов, когда применение других методов НК затруднено или невозможно	Активность, трансформация, рассеивание, поглощение и др. явления излучения, затухания и искажения сигналов АЭ в объекте и, следовательно, выявляемость дефектов существенно зависят от вида применяемых конструкционных материалов и способа их соединения
Метод является интегральным и обеспечивает контроль объекта с использованием одного или нескольких преобразователей в случае необходимости определения места нахождения (локации) источника	Усложнение и удорожание используемой аппаратуры, в основном, в области согласования и обеспечения непрерывности сбора и анализа АЭ данных по нескольким каналам регистрации. Трудности обработки больших массивов данных
Метод позволяет сократить общий объём применения регламентируемых методов НК при техническом диагностировании объекта контроля до зон, назначенных по результатам АЭ контроля	При обнаружении методом АЭ на объекте контроля каждого дефекта в обязательном порядке требуется подтверждение этого факта с помощью других дополнительных методов НК. Таким образом результат АЭК зависит от точности и чувствительности дополнительного метода НК
Метод позволяет проводить непрерывный контроль (мониторинг) исследуемых объектов в реальном масштабе времени с	Сложность организации хранения и обработки большого массива поступающей информации и принятия решения только по АЭ данным без

Преимущества применения метода АЭ	Ограничения применения метода АЭ связанные с его преимуществом
целью их остановки в случае появления и развития опасных дефектов	технологических данных и результатов применения других методов НК
Метод позволяет проводить контроль различных технологических процессов и может быть системой обратной связи для управления технологическим процессом	Узкая номенклатура техники, для которой документально установлена взаимосвязь между АЭ и протекающими процессами и явлениями в достаточном объёме для применения метода АЭ в качестве самостоятельного метода (т.е. не требующего подтверждения результатов АЭК дополнительным методом НК)

Из всего выше сказанного следует, что благодаря высокой чувствительности метода возможен НК широкого спектра процессов и явлений с гарантией того, что сигнал от источника АЭ/дефекта будет зарегистрирован. Однако, если сигнал АЭ шумоподобен или его амплитуда не превышает уровень шума, то дефект с высокой вероятностью будет пропущен либо из-за трудности выделения его из шума, либо из-за того, что дефект находится на ранней стадии своего развития и не будет подтвержден дополнительными методами НК. Устранить данную ситуацию возможно только путем доведения методологии метода АЭ до уровня «самостоятельной» или «самодостаточной», т.е. не требующей подтверждения результатов АЭК дополнительным методом НК. Решить обозначенные вопросы и использовать полный потенциал, заложенный в АЭК, невозможно методами и средствами, применяемыми в методе сегодня (о чем подробнее также будет говориться далее в п. 1.4 и 1.5). Поэтому необходимы принципиально новые подходы к обработке акустических сигналов, особенно шумоподобных или регистрируемых на уровне окружающих шумов.

1.3. Анализ источников шумоподобной акустической эмиссии и их использование при диагностике промышленного оборудования

В настоящее время метод АЭ применяется в двух основных направлениях: в качестве метода исследований экспериментальной физики (для изучения природы самого явления АЭ и изучения с его помощью кинетики механизмов упрочнения, деформации или разрушения материалов [25, 27, 28 и др.]) и в качестве метода НК, что рассмотрим подробнее.

Как уже говорилось выше в системе НК основной сферой применения метода АЭ является оценка поврежденности и герметичности основного материала и соединений технологического оборудования ОПО. Среди которого основную долю составляет

емкостное технологическое оборудование химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств, а также объекты котлонадзора – это сосуды, аппараты, резервуары, трубопроводы, котлы, печи и т.д. На втором месте силовые конструкции, это, главным образом, подъемные краны, подъемники и буровые вышки. Широкое применение метода АЭ на указанном типе промышленного оборудования обусловлено тем, что его возможно вывести из эксплуатации и относительно бесшумно нагрузить, т.е. обеспечить применения метода АЭ в условиях низкой шумности при уровне шумов и помех, удовлетворяющих правилу [10]:

$$\begin{cases} U_{\text{ША}} < U_{\text{Ш}} \leq 26 \text{ дБ} \\ f_{\text{П}} \leq 0,01 \text{ Гц} \end{cases}, \quad (1.1)$$

где: $U_{\text{Ш}}$ – амплитудный уровень непрерывных шумов (непрерывная АЭ) в дБ; $U_{\text{ША}}$ – собственный шум АЭ аппаратуры в дБ, $f_{\text{П}}$ – частота импульсных помех (дискретная АЭ) в Гц. На основании существующих требований [37] при невыполнении условия (1.1) применение метода АЭ при НК и ТД следует исключить. Между тем в некоторых случаях АЭ контроль может быть проведен при $U_{\text{Ш}} > 26$ дБ (20 мкВ), но только при наличии научно-технического обоснования возможности выявления требуемых источников АЭ [10]. Однако даже в этом случае должен сохраняться требуемый динамический диапазон измерения амплитуды сигнала, тогда в соответствии с требованиями [10, 29] в предельном случае условие (1.1) может быть переписано, как:

$$\begin{cases} U_{\text{ША}} < U_{\text{Ш}} \leq (D - 60 \text{ дБ}) \approx 40 \text{ дБ} \\ f_{\text{П}} \leq 0,01 \text{ Гц} \end{cases}, \quad (1.2)$$

где: D – динамический диапазон аппаратуры измерения амплитуды сигналов АЭ в дБ, при котором проходят неискаженными сигналы АЭ с наибольшими амплитудами. Поскольку, у большинства современных промышленных АЭ систем $D \approx 100$ дБ (10^5 мкВ), поэтому по (1.2) в обоснованных случаях АЭ контроль возможен при $U_{\text{Ш}} \approx 40$ дБ (100 мкВ).

Между тем начиная с 90-х годов XX века возможности аппаратно-программных средств ЭВМ увеличились многократно, что позволило записывать, накапливать и обрабатывать большие массивы данных, а также выполнять сложные математические вычисления. Общий прогресс повысил и уровень аппаратно-программных средств метода АЭ (о чем подробнее будет говориться далее в п. 1.4). Работы выполненные и опубликованные за два последних десятилетия показывают, что только за счет использования современных достижений теории обработки сигналов сфера применения метода при НК оборудования ОПО объективно может быть расширена и на оборудование, при контроле которого соблюдение требований (1.1) и (1.2)

затруднительно или в принципе не выполнимо. Кроме этого, быстрыми темпами развивается новое направление – АЭ мониторинг, которое подразумевает переход от периодического контроля оборудования к непрерывному режиму его контроля во время эксплуатации.

Рассмотрим некоторые шумоподобные АЭ источники и их использование в качестве диагностических признаков с учетом того, что часть из описываемых способов применения метода еще находится на стадии поисковых, научно-исследовательских или опытно-промышленных работ, т.е. не приобрели форму законченных методик промышленного контроля или мониторинга, но имеют такую перспективу.

Истечение рабочего продукта (испытательной среды) из емкостного оборудования является шумоподобным источником АЭ аэрогидродинамического типа. Мощность такого источника зависит от размера несплошности, типа среды и разности давлений между объемами куда и от куда происходит ее истечение [6, 15]. Необходимость исследований в данном направлении диктуется задачами обнаружения негерметичности емкостного оборудования ОПО, локализация (определении координат) места пропуски и, в перспективе, оценки размера несплошности через которую происходит течь среды. При этом возможно очень много сопутствующих АЭ источников, а именно при истечении среды происходит: конденсация среды и стекание капель по стенкам; движение границ раздела фаз; образование, отрыв и всплытие пузырьков (при истечении газа в жидкость), а также атмосферные осадки. Несмотря на это, в данном направлении сегодня достигнуты определенные успехи, а именно разработаны: способы и аппаратура определения класса герметичности запорно-регулирующей аппаратуры [30-32 и др.], корреляционные и спектральные способы локализации места течи на трубопроводах [30, 33-35 и др.]; способ фильтрации АЭ данных при оценке герметичности котлов железнодорожных цистерн [36]; способ трехмерной локации источника АЭ по продукту [37] и способы определения наличия в среде другой фазы в процессе ее движения [38]. Однако место локализации в основном (кроме корреляционных способов) обнаруживается путем обхода объекта контроля с прибором, или приравнивается к месту установки (области контроля) преобразователя которым регистрируется высокая АЭ активность, или методом последовательного приближения преобразователей АЭ к месту течи (прослушивание объекта). Корреляционные способы позволяют определить координаты течи, но успех пока достигнут только на линейных объектах контроля (трубопроводы). В известных способах положительный эффект достигается применением алгоритмов фильтрации

данных и не используются способы распознавания и классификации АЭ по типу их источника.

Кавитация также является аэрогидродинамическим шумоподобным источником АЭ и выделяется в отдельную группу в связи с тем, что она возникает в жидких средах только при разности давлений, способных образовать в ней паровые или газовые каверны (разрыв сплошности жидкости), которые увеличиваясь до критического размера схлопываются с рассеиванием энергии тепловыми, акустическими и оптическими эффектами. Причинами появления кавитации в промышленных условиях могут быть: высокоскоростное течение жидкости по каналу переменного сечения (гидродинамическая или перемещающаяся кавитация); движение тела в жидкости или обтекание струей жидкости покоящегося тела (присоединительная или вихревая кавитация); действие мощного акустического излучателя или гидравлического удара или мощного электрического разряда в жидкости (акустическая или вибрационная кавитация). Необходимость обнаружения и оценки кавитации диктуется задачами: снижения кавитационного износа частей роторных устройств, или поиска эффективного режима работы роторных устройств (углы установки лопаток, давление на всасе или выходе насоса и др.), или поддержания должного уровня кавитации в технологических процессах (диспергирование, перемешивание, нагрев и т.д.). Сопутствующими кавитации источниками АЭ при этом являются: движение жидкости; колебание границы раздел фаз; трение и износ подвижных частей оборудования, а также их вибрация. Успешными примерами применения метода АЭ в данном направлении являются: АЭ мониторинг режимов работы перемешивающих роторных устройств [39] и обнаружение перехода центробежного насоса на низкоэффективный кавитационный режим работы [40]. В обоих случаях положительный эффект достигается с использованием интегральных оценочных параметров АЭ и не известно в данном направлении применение алгоритмов, разделяющих АЭ от различных источников.

Фазовые переходы (превращения) заключаются в трансформации вещества из одной термодинамической фазы в другую при изменении условий внешнего воздействия на него. Многими авторами показано, что АЭ сопровождает фазовые переходы, как I, так и II рода. Однако основным практическим применением метода АЭ является контроль процесса сварки материалов, где источниками шумоподобной АЭ являются: истечение защитного газа; горение дуги; плавление и кристаллизация основного и присадочного металла; образование и растрескивание оксидной пленки и шлака; термические трещины, а также накладываемые производственно-технологические шумы [6, 41]. Остальные

известные примеры применения метода АЭ пока относятся к исследовательским направлениям, где наиболее перспективными представляются АЭ способы наблюдения за процессами плавления, кристаллизации и кипения веществ [22, 27, 42 и др.], а также АЭ способы изучения: мартенситных и других полиморфных превращений; распада пересыщенных твердых растворов; превращений в магнетиках и полупроводниках; переходов систем через критическую точку состояния фаз [25, 27, 28, 43 и др.]. При исследовании фазовых превращений активно используются спектральные, статистические и кластерные методы анализа АЭ [22, 28, 41, 43].

Химические реакции протекают при превращении одних веществ в другие с изменением состава и могут быть чисто химическими, либо физико-химическими и электрохимическими. Исследования показывают, что взаимодействие, растворение, электролиз или разложение различных веществ сопровождается АЭ от инфразвукового (горение, взрыв) до ультразвукового диапазона частот. Характер и мощность АЭ таких источников зависит от скорости протекания химической реакции и объема взаимодействующего вещества. Необходимость анализа шумоподобной АЭ от химических реакций диктуется повышением требований к качеству и безопасности производства веществ, а также их хранения и транспортировки, особенно взрыво-, пожароопасных и токсичных. В данном направлении достигнуты определенные успехи, а именно разработаны АЭ способы: диагностики кинетики роста и растворения кристаллических веществ [22, 44]; исследования взаимодействия жидких сред [45]; контроля химических технологических процессов получения веществ [46]; контроль химического повреждения металла кислотой [47]; контроля работы и разрушения топливных элементов [48], а также способ обеспечения безопасности хранения и разложения перекиси водорода [49]. Однако основными химическими процессами, к которым в последнее время оказывается наиболее пристальное внимание, являются коррозия и окисление (горение) веществ, поэтому рассмотрим их отдельно и более подробно.

Коррозия в зависимости от природы относится к химическим или электрохимическим источникам шумоподобной АЭ и возникает при взаимодействии объекта с жидкой или газообразной средой. Мощность такого источника зависит от вида коррозии и окружающих условий, которые определяют, как скорость самой коррозии, так и наличие сопутствующих явлений [6, 50]. Проблема контроля коррозии актуальна, поскольку она является основной причиной наступления аварийного состояния и отказа стационарного промышленного оборудования с существенными экологическими и

экономическими потерями. Так, по данным [50] в большинстве стран потери от коррозии составляет до 6% национального дохода и до 12% доходят безвозвратные потери металла в пересчете от первоначальной массы выработки. В России порядка 70% всех отказов емкостного нефтегазового промышленного оборудования связано с коррозией [50, 51]. В связи с этим необходимо знать и контролировать: место коррозионного повреждения, скорость коррозии и, в перспективе, размер коррозионного повреждения. При этом основными шумоподобными АЭ источниками при коррозионном повреждении металла могут быть: химическое растворение материала; образование, отрыв и всплытие газовых пузырьков; движение границы раздела фаз; растрескивание материала с образованием сетки трещин по границам или телу зерен; расслоение материала с образованием и разрушением блистеров; растрескивание оксидной пленки, отслоение продуктов коррозии и электрический пробой оксидной пленки. Очевидно, что такое обилие коррозионных процессов и сопутствующих явлений сильно усложняет задачу идентификации типа источника по АЭ, но на сегодняшний день достигнуты определенные успехи, а именно разрабатываются: способы АЭ обнаружения мест коррозионных повреждений [47, 52 и др.], способы АЭ контроля наводороженности металла [53], способ АЭ интегральной толщинометрии тонкостенных объектов [54], способ АЭ контроля дефектности материала при его электрохимической обработке [55], а также многочисленные способы АЭ контроля и мониторинга технического состояния химического и нефтехимического оборудования [11, 47 и др.]. Последнее показывает, что способы АЭ контроля и мониторинга стационарного оборудования уже хорошо проработаны, поэтому здесь примечательны попытки применения АЭ мониторинга для оценки поврежденности передвижного оборудования: цистерн непосредственно при транспортировке жидких сред на автомобильном шасси [56] и на морских судах [57], а также контроль рам полуприцепов грузовиков [58]. В этом случае к обозначенным выше источникам добавляются помехи и шумы, связанные с: инерционным движением продукта (жидкости); вибрацией элементов; трением в опорах, а также осадками (дождь, наледь, ветер). Несмотря на все обозначенные успехи многие авторы приведенных работ отмечают необходимость развития логических методов фильтрации и комплексной обработки данных.

Окисление (горение) веществ также относится к химическим источникам шумоподобной АЭ и возникает при взаимодействии веществ, одно из которых является окислителем, а второе – восстановителем (горючее). Данный источник выделен отдельно поскольку литературный обзор показал увеличивающийся за последние два десятилетия

объем работ в направлении применения метода АЭ для контроля скорости и полноты сгорания топливных смесей, а также определение координат начала воспламенения смеси в цилиндре (в дизельных двигателях). Основными целями рассмотренных работ обозначается снижение: расхода топлива; выброса загрязняющих веществ и шумности работы тяговых устройств. Данное направление является относительно новым, поэтому в настоящее время пока еще исследуются характеристики АЭ сопровождающее горения топливной смеси в газотурбинных двигателях [59] и поршневых двигателях внутреннего сгорания [60]. Следует также отметить, что в этом направлении известно применение пока только интегральных параметров оценки АЭ, за исключением работы [61], когда при исследовании звука, сопровождающего горение металлов при определении их химического состава используются спектральные характеристики АЭ.

Трение и изнашивание относятся к шумоподобной АЭ механической природы, сопровождающее относительное смещение соприкасающихся твердых тел вдоль контактной плоскости либо слоев жидкости или газа вдоль твердого тела (рассматривается только внешнее трение). Обуславливает трение и износ комплекс явлений, протекающий в зоне соприкосновения тела с контртелом или веществом, в результате которого между ними возникают силы контактного взаимодействия [6, 14, 16]. Известно [16], что в общем случае по кинематическому признаку контактное взаимодействие можно разделить на два вида: качение и скольжение. В зависимости от вида и условий трения будет наблюдаться различный состав источников АЭ, но в общем виде основными являются [6, 14, 16]: упругое ударное или пластическое взаимодействие шероховатости и волнистости поверхностей; разрушение адгезионных или когезионных связей; структурно-фазовые переходы; образование, отслоение или разрушение защитных пленок; трещинообразование и отделение частиц износа материала; трибоэлектрические эффекты; вибрация или неравномерное контактное движение (stick-slip эффект, качение с проскальзыванием, наличие на контактных поверхностях забоин или абразивных частиц и т.д.) и кавитация (подшипники скольжения, гидростатические и гидродинамические). Необходимость обнаружения и оценки данного источника диктуется тем, что износ одна из основных причин наступления аварийного состояния и выхода из строя динамического промышленного оборудования, а также существенных экономических потерь. Так, по данным [16] потери из-за трения и износа достигают до 8% национального дохода высокоразвитых стран и тратиться до 25% вырабатываемой за год энергии в мире на преодоление сопротивления трения. Необходимость обнаружения и оценки трибологических источников АЭ диктуется задачами организации обратной

связи, позволяющей без остановки и разборки узлов трения: измерять, контролировать и, в перспективе, управлять скоростью износа частей машин и механизмов, а также устанавливать причину выхода узла из строя в случае аварий и инцидентов [62]. Сопутствующими источниками АЭ при этом являются наложенные (внешние по п. 1.2) колебания, вызванные работой сопряженных с контролируемыми узлами трения устройств в виде: рабочего шума силовых (приводных) установок (сгорание топлива, электромагнитные явления); движения жидкости или газа (при перекачивании сред); вибрация. Успешными примерами применения метода АЭ в данном направлении являются способы технического диагностирования и мониторинга режима работы элементов сложных устройств и кинематических пар в составе: газотурбинных двигателей и паровых турбин [63-65], турбонасосов [66], поршневых компрессоров [67], двигателей внутреннего сгорания [68, 69], и многоступенчатых зубчатых передач [70]. Кроме этого разработаны способы оценки поврежденности тяжело нагруженных опор качения в виде: роликов вращающихся печей [71], рельсового пути и/или вагонных колес [72, 73], роликов подъемных мостов [74], упорных подшипников [75]. Также разработаны способы диагностики и оценки поврежденности подшипников качения [64, 76], скольжения [77] и оценки качества смазочных материалов, трибвосстанавливающих составов и присадок [78.]. Кроме этого в работе [79] показана перспективность метода АЭ для контроля тихоходного (низкооборотистого) высоконагруженного оборудования, где не чувствительна вибродиагностика (из-за малой инерции вращающихся масс) и ограничено применение шумометрии (высокий уровень окружающих технологических шумов). Такие существенные успехи применения метода АЭ в трибологии обусловлено тем, что его внедрение метода в эту отрасль науки и техники началось еще в 70-х годах XX-века [16].

Однако в связи со сложностью и неизученностью самого процесс трения и изнашивания, а также множеством одновременно действующих источников АЭ, до сих пор остаются проблемы, сдерживающие применение метода АЭ – это: обработка большого объема данных; идентификация сигналов и характеристик АЭ, связанных с неисправностью или механизмом износа; фильтрация нестационарного шума трения от неисследуемых узлов и сопряженных механизмов; определение положения источников АЭ.

Электрические, магнитные и электромагнитные шумоподобные источники АЭ вызывают явления соответствующей природы и встречаются при диагностике и контроле силового электрического оборудования (трансформаторы, высоковольтные линии,

электрические машины и механизмы и т.д.), а также собственный шум регистрирующей АЭ аппаратуры. В общем виде основными электрическими и/или магнитными источниками АЭ являются [6]: короткие искровые разряды или пробой в месте контактов или нарушения целостности электроизоляции; электрическая дуга; магнитострикционное колебание всего элемента или локальная магнитоакустическая эмиссия, вызываемая действием протекающего переменного тока или внешнего магнитного поля; неравномерная намагничиваемость материала (эффект Баркгаузена (H.G. Barkhausen)); гальванические пары с существенно отличающимися электрохимическими потенциалами; собственный шум работы электронных компонентов (тепловой, дробовой и шум токораспределения). В электрооборудовании действие основных источников АЭ часто сопровождают следующие дополнительные акустические эффекты: растрескивание, трение, износ и вибрация элементов из-за их магнитострикционного перемещения; кавитация, вскипание жидкости и всплытие газовых пузырьков при электрическом пробое в жидкость; фазовые превращения в материалах; эффекты связанные с релаксацией электризации диэлектриков (статического электричества). Основным применением метода АЭ в данном направлении является контроль: целостности керамических изоляторов и сварочных процессов, где уже достигнуты существенные успехи [6, 41, 80]. Также ведутся работы по созданию основ АЭ контроля высоковольтных плазменно-электрохимических процессов нанесения покрытий (оксидирование, анодирование) [81, 82]. Особенно интенсивно в настоящее время разрабатываются подходы АЭ диагностики высоковольтных трансформаторов, где апробируются способы контроля: целостности и герметичности корпусов; целостности магнитных пластинчатых сердечников; наличии межвиткового замыкания, пробоев в разделительных средах и частичных разрядов; качества закрепления внутренних устройств [83-85]. При этом в работе [85] показано, что в задаче обнаружения частичных разрядов АЭ метод не уступает электрическим методам и даже имеет преимущество при определении координат источника. Также авторы отмечают необходимость повышения помехоустойчивости АЭ метода за счет применения правильно подобранных аналоговых систем или цифровых алгоритмов фильтрации.

Осадки это шумоподобные источники АЭ связанные с присутствием в атмосфере воды и выпадающей из облаков в жидком (дождь, изморось) или твердом (снег, град) состоянии на поверхность контролируемого оборудования или осаждающейся на них из воздуха при изменении его температуры. Источниками АЭ в этом случае являются: падающие капли дождя / град; фазовый переход (кристаллизация воды и таяние снега);

стекание капель; растрескивание наледи; отслоение наледи от объекта. При контроле осадки считаются АЭ помехами и от них стараются избавиться используя все возможные способы фильтрации данных. Однако современный уровень техники показывает, что за счет передовых подходов к анализу АЭ данных можно шум превратить в диагностический признак. Примером здесь являются работы [86-87], где капли дождя используются в качестве источника акустических волн для обнаружения дефектов и повреждений бетонного настила автомобильного моста. Такой оригинальный подход навряд ли будет использоваться при АЭ контроле, но в системах мониторинга этот прием может быть вполне применим.

Выявление на фоне промышленных шумов АЭ сопровождающей деформацию и разрушение конструкционных материалов несущих элементов ОПО также не потеряла актуальность. В данном направлении современные статистико-аналитические алгоритмы обработки и анализа АЭ позволяют выделять сигналы из электрических и механических помех. Благодаря этому начал активно развиваться АЭ мониторинг емкостного оборудования (АЭ контроль в режиме эксплуатации оборудования) [88, 89 и др.], а также весьма расширился спектр контролируемых объектов. Так имеются положительные результаты АЭ мониторинга технического состояния шагающих экскаваторов (драглайнов) без вывода их из эксплуатации [90]. Развивается направление АЭ мониторинга и контроля поврежденности элементов турбин генераторов промышленных ветровых электростанций (ветряков) [91]. Также интенсивно развиваются технологии АЭ мониторинга технического состояния крупных пролетных строений в виде: раздвижных крыш стадионов [74], стационарных [92] и поворотных мостов [74]. Тут следует выделить, что в последних двух типах объектов контроля под действием проезжающих машин дополнительно возникает шумоподобная АЭ от контакта колес с покрытием и последствия динамического нагружения в виде вибрации моста и его перемещения с трением в скользящих опорах и компенсаторах тепловых зазоров.

Подытоживая здесь можно выделить следующее. Неоднозначность проявления и обилие сопутствующих АЭ источников вызывает сложность применения метода для диагностики технического состояния опасных производственных объектов по шумоподобным сигналам АЭ или в условиях высоких промышленных шумов. Авторы обозначенных работ решали разные технические задачи, но едины в одном, что в средствах оценки АЭ необходимы алгоритмы, распознающие типы источников АЭ, или фильтры, позволяющие повысить эффективность применения существующих средств АЭ

метода. В известных способах положительный эффект достигается применением алгоритмов фильтрации данных и практически не используются способы распознавания и классификации АЭ по типу их источника. Между тем, такие попытки в лабораторных исследованиях уже имеются, что будет подробнее рассмотрено далее в Главе 2, но адаптации к производственным задачам с учетом трансформации сигнала (из-за затухания, расхождения и дисперсии) пока нет. Следовательно, потенциал метода в этом направлении не раскрыт и применение способов классификации источников АЭ может позволить получение результатов нового уровня.

Также из вышесказанного следует, что процессы и сопутствующие им явления, генерирующие шумоподобную АЭ, многочисленны и взаимосвязаны, что существенно осложняет их изучение, поскольку результаты исследования, моделирования или изучения отдельно взятого источника АЭ в виде процесса или явления становятся малоприменимыми для практических применений без учета синергетического эффекта взаимного влияния источников АЭ друг на друга. Например, в работе [93] показано, что при трении и изнашивании могут протекать такие химические явления которые в отсутствие трения не реализуются. А в [14] приводятся данные о такой тесной связи трения с электрическими явлениями, благодаря которой, можно выработать приемы, позволяющие управлять процессом изнашивания с помощью схем электрических цепей. Аналогичная ситуация и с коррозией, когда ее скоростью управляют электрическими методами [50]. Также известно, что на процессы трения и коррозию критично влияет температура, как контролируемого объекта, так и окружающей среды, а также ее влажность и кислотность [50, 93]. Таким образом, необходимы методы и средства исследования, позволяющие проводить комплексное изучение и оценку шумоподобных источников АЭ непосредственно во время контроля / испытания / эксплуатации промышленного объекта.

1.4. Анализ текущего технического уровня средств метода акустической эмиссии

Для реализации метода АЭ в настоящее время используется электронная аппаратура, имеющая аналоговый и цифровой блоки. Принципиальная схема аппаратной реализации метода АЭ представлена на рисунке 1.3 в которую входят: преобразователи АЭ пьезоэлектрического типа (ПАЭ); предварительные усилители (ПУ); кабельные или радио средства передачи данных (СПД); аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и блок обработки АЭ информации (БОИ) также называемый АЭ-процессор [94].

Аппаратные решения сегодняшних модулей АЭ систем разработаны в последние 10-25 лет, а их программная часть обновляется непрерывно. При этом сегодня на рынке АЭ аппаратуры уровень ее унификации и взаимозаменяемости достиг такого развития, что позволяет использовать аппаратно-программные модули разных производителей в составе различных АЭ систем. Поэтому в настоящее время имеется возможность выполнять сборку или адаптацию АЭ аппаратуры под конкретное назначение с учетом географических, производственных и технических ограничений применения метода АЭ [94]. Классификация и основные требования к промышленным АЭ системам стандартизированы и приведены в [10, 29, 95]. Характеристики исследовательских АЭ систем не нормируются и выбираются в каждом конкретном случае самим исследователем, что порой затрудняет сравнение и интерпретацию результатов, полученных различными авторами. Однако, чтобы показать сегодняшний технический уровень данного вида техники здесь приведены предельные характеристики основных модулей передовых аппаратно-программных средств метода.

1.4.1. Преобразователи акустической эмиссии

Преобразователь АЭ (ПАЭ) предназначен для приема и пьезоэлектрического преобразования акустического сигнала в виде упругого смещения поверхности объекта контроля, вызванного действием распространяющейся волны(волн) от ее источника(ков) в электрический отклик, который используется для оценки этого источника(ков). ПАЭ характеризуется коэффициентом преобразования в диапазоне рабочих частот [95]. Коэффициент преобразования (K_{II}) определяет минимальное смещение поверхности (δ_m), которое может быть зарегистрировано при движении акустической волны, а диапазон рабочих частот (Δf) – скорость нарастания ее переднего фронта (скорость развития источника). Чувствительность и частотный диапазон ПАЭ определяются типом пьезоматериала, его геометрией и способом демпфирования и находятся в противофазе, т.е. повышение чувствительности снижает диапазон рабочих частот и наоборот [6]. При этом полосовые и широкополосные ПАЭ более многофункциональные, поэтому применяются в исследовательских работах, а резонансные более узкоспециализированные и используются там, где уже доказана возможность их применения.

По ряду преимуществ [6] сегодня основным пьезоматериалом ПАЭ является цирконат-титанат свинца (PZT). По оценкам [96] предельная чувствительность ПАЭ с пьезоэлементом из PZT в полосовом исполнении ($\Delta f = 0,1 \div 0,3$ МГц) составляет $\delta_m = 10^{-14}$

м, а в широкополосном исполнении ($\Delta f = 0,1 \div 2,0$ МГц) $\delta_m = 10^{-13}$ м. По данным [3] чувствительность ПАЭ в резонансном исполнении может достигать $\delta_m = 10^{-17}$ м. Что по коэффициенту преобразования ($K_{П}$) находится в диапазонах: $(50 \div 100) \cdot 10^6$ В/м и $(100 \div 200) \cdot 10^6$ В/м соответственно для широкополосных и полосовых ПАЭ, и более $200 \cdot 10^6$ В/м для резонансных [95]. При этом передовыми являются особоширокополосные ПАЭ, имеющие следующие рабочие диапазоны частот (Δf): $0,02 \div 1,0$ МГц; $0,3 \div 1,8$ МГц и $0,5 \div 4,5$ МГц. Максимальная рабочая температура ПАЭ (t_{max}) ограничивается половиной температуры фазового перехода (точки Кюри) пьезоэлемента, что для PZT составляет $t_{max} = +125 \div 150$ °С. Если требуется более высокая рабочая температура ПАЭ, то максимально ее поднять возможно применением в качестве пьезоэлемента ниобат лития (LN). LN по сравнению с PZT имеет меньшую чувствительность, но гораздо более высокую точку Кюри (~ 1150 °С). Сегодня особоширокополосные ПАЭ из LN имеют следующие характеристики: $\Delta f = 0,3 \div 1,4$ МГц при $t_{max} = +200$ °С и $\Delta f = 0,05 \div 0,65$ МГц при $t_{max} = +540$ °С.

1.4.2. Предварительные усилители

Предварительные усилители (ПУ) главным образом предназначены для согласования высокого импеданса выхода ПАЭ с низкоимпедансным входом измерительной аппаратуры с учетом потерь сигнала АЭ в средствах передачи данных. С пьезоэлектрическими датчиками используют ПУ двух типов: усилителя заряда и усилители напряжения [97]. Каждый тип обладает своими преимуществами и недостатками. Так первый тип ПУ имеет низкое входной импеданс, что уменьшает чувствительность к входным шумам, но повышает нагрузку на пьезоэлемент и негативно сказывается на чувствительности и полосе пропускания ПАЭ. Второй тип ПУ отличается более простой схемой, а по характеристикам наоборот, имеет высокий входной импеданс, что мало сказывается на характеристиках пьезоэлемента, но повышает уровень шумов в АЭ сигнале на входе, потому требует, как можно близкого расположения ПУ к ПАЭ (вплоть до интегрирования его в корпус ПАЭ). Сегодня в АЭ аппаратуре используются оба типа ПУ, но усилители заряда не имеют альтернативы там, где ПУ должен находиться на большом расстоянии от ПАЭ (~ 100 м). Для промышленного использования выпускаются полосовые ПУ ($\Delta f < 400$ кГц) с фиксированным коэффициентом усиления (k_V), для исследовательского – широкополосные ($\Delta f = 0,01 \div 2,5$ МГц) и особоширокополосные ($\Delta f = 0,003 \div 2$ МГц и $0,01 \div 5$ МГц) с возможностью выбора k_V в диапазоне $20 \div 60$ дБ ($10^1 \div 10^3$ раз). При этом ширина полосы пропускания снижается

(например, у ПУ с $\Delta f \approx 0,01 \div 2,5$ МГц при $k_{\gamma} = 20$ дБ, при $k_{\gamma} = 60$ дБ $\Delta f \approx 0,01 \div 0,9$ МГц). Также с увеличением k_{γ} пропорционально снижается динамический диапазон АЭ аппаратуры, но понижается и уровень собственных шумов (\approx с 5 до 3 мкВ). Максимальная рабочая температура ПУ ограничивается рабочей температурой электронных компонентов и не превышает $+ 75$ °С. Поэтому интегрирование ПУ в корпус ПАЭ снижает рабочую температуру преобразователя до той же температуры, независимо от материала используемого пьезоэлемента.

1.4.3. Средства передачи данных

Средства передачи данных (СПД) предназначены для организации связи между ПУ и БОИ. В качестве СПД наиболее прогрессивной сегодня является технология беспроводной передачи АЭ данных по цифровому радиоканалу с использованием: радиостанций, модуля WiFi или сотовой связи. Однако она имеет меньшую полосу пропускания частот (Δf), более высокую стоимость, требует получения разрешения на использование радиочастот и обеспечения прямой видимости между передатчиком и приемником, поэтому основной остается технология проводной передачи АЭ данных. Сигнальные кабели выбираются по многим параметрам, но для АЭ метода должны обеспечивать [10, 29]: частотный диапазон до 5 МГц; электрическая емкость до 100 пФ/м; потери сигнала в рабочем частотном диапазоне до 1 дБ на 30 м длины; максимальное передаваемое напряжение до 40 В / мощность до 5 Вт; сопротивление изоляции между жилами более 100 МОм. Вышеприведенные характеристики при передаче сигнала АЭ позволяют обеспечить экранированные радиочастотный коаксиальный кабель (РК) и кабель типа витая пара (ВП).

1.4.4. Аналого-цифровой преобразователь и блок обработки информации

Сегодня существует три работоспособных архитектуры построения цифровых АЭ системы, отличающихся друг от друга вариантами компоновки СПД, АЦП и БОИ [94].

БОИ (или АЭ-процессор) предназначен для регистрации, обработки, хранения и визуализации АЭ данных. В традиционном варианте архитектуры он представляет собой ЭВМ на базе персонального или переносного компьютера в который интегрированы платы АЦП. По другим архитектурным вариантам АЦП возможно вынести в отдельный корпус или встроить в радиомодуль с которыми ЭВМ взаимодействует через радио или кабельные средства связи соответственно. Последнее позволяет устанавливать АЦП непосредственно около ПАЭ, а БОИ выносить далеко от объекта контроля. Конечно

каждая архитектура (схема) имеет свои преимущества и недостатки, но наличие обозначенных вариантов АЭ аппаратуры позволяет преодолеть ряд ограничений: географических (удаленное расположение объекта контроля; жаркий или холодный климат; пересечение объектом водных преград, автодорог и др.), промышленного (габариты объекта контроля; недоступность объекта в блоке или на промплощадке; производственные шумы и др.) и технологии применения метода (искро- и взрывозащищенности АЭ аппаратуры; тепловой и радиационной защиты элементов АЭ систем и персонала; повышение производительности ЭВМ БОИ и др.) [94].

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) – устройство, преобразующее входное напряжение (аналоговый сигнал) в дискретный код (цифровой сигнал). АЦП является элементом аппаратуры, определяющим качество записываемого АЭ сигнала и влияющим на ошибки всей последующей обработки. Основными ошибками при этом являются ошибки квантования и дискретизации. Ошибки квантования устраняются увеличением разрядности АЦП (уровней квантования), а дискретизации – повышением частоты опроса (частоты дискретизации). В настоящее время передовые АЦП имеют разрядность 18 бит, частоту дискретизации до 40 МГц. Что позволяет обеспечить: динамический диапазон более 100 дБ; точность измерения амплитуды на уровне 0,001 дБ/1 ед. АЦП; полосу пропускания до 20 МГц; разрешение по времени регистрации порядка 25 нс. Еще одной важной особенностью указанных АЦП, является выбор способа регистрации АЭ в, так называемом, «пороговом» и «беспороговом» режиме.

Пороговый режим регистрации АЭ подразумевает применение уровня (порога) амплитудной дискриминации, поэтому регистрируются только те сигналы, амплитуда которых превышает этот уровень (рисунок 1.4а). Такой режим записи незначительно использует ресурсы ЭВМ БОИ и требует меньших объемов памяти для хранения АЭ данных. Однако в настоящее время понятно, что такой способ обнаружения и анализа АЭ практически достиг предела своего развития, что объясняется следующими причинами:

1) величина порога устанавливается от уровня шума, поэтому при анализе АЭ не учитывается значительная доля «полезной» информации (ниже уровня порога), что принципиально не позволяет обеспечить ранее обнаружение предвестников негативных процессов (разрушения);

2) величины всех оценочных параметров АЭ (кроме амплитуды АЭ [6]) зависят от уровня порога дискриминации, который выставляется оператором перед АЭ контролем, но в зависимости от уровня шума может корректироваться во время его проведения, как в ручном, так и автоматическом (плавающий порог) режиме. При этом изменение уровня

порога уменьшает чувствительность и повышает неопределенность АЭ контроля даже в случае, когда сигналы от источника были зарегистрированы при одном уровне порога, но отсутствовали – при другом уровне порога;

3) наличие акустического шума, сопоставимого с уровнем порога дискриминации, приводит к сбою в работе порогового детектора и, соответственно, к ошибочным измерениям и оценкам АЭ. Тот же эффект наблюдается и в условиях не стационарных (плавающих) промышленных шумов, поэтому применение порогового способа резко ограничено в условиях низкого соотношения сигнал/шум;

4) из-за вышеназванных причин «пороговые параметры» оценки АЭ нестабильны при распознавании источников АЭ различного происхождения (механизмов повреждения), т.к. недостаток информации не позволяют корректно составить параметрический образ источника АЭ особенно в условиях сопоставимого уровня шума, а, следовательно, обеспечить адекватное сравнение и достоверный вывод.

Следует отметить, что разработаны модификации порогового способа, позволяющие снизить некоторые его недостатки. Так, существует модификация устойчивая к плавающему шуму за счет применения алгоритма автоматической корректировки уровня порога в зависимости от среднеквадратичного значения АЭ – так называемого «плавающего порога» или «автопорога» [98]. Однако в работах [99, 100] было показано, что в расчет среднеквадратичного значения АЭ попадает и шум, и сигнал, поэтому данный способ завышает уровень порога, что приводит к снижению точности определения начала сигналов, а значит и координат источников АЭ. Известны модификации порогового способа, позволяющие повысить точность детектирования времени прихода импульсных сигналов [41, 101, 102], но полностью указанные недостатки принципиально не могут быть устранены пороговыми методами [103, А2].

Устранить вышеуказанные проблемы и повысить информативность метода АЭ может позволить переход на беспороговый режим регистрации АЭ [103 - 107], который заключается в непрерывной записи и анализе всей поступающей АЭ (т.е. и сигналов, и шума – рисунок 1.4б) с точностью до отсчета аналого-цифрового преобразования (АЦП). Поэтому такой режим записи подразумевает работу с гораздо большим объемом хранимой, передаваемой и анализируемой информации и, естественно, требует применение ЭВМ с более скоростными устройствами преобразования, обработки, записи и хранения данных, а также более прогрессивных алгоритмов обработки АЭ информации [103-105]. В настоящее время возможны три способа регистрации АЭ в беспороговом

режиме (рисунок 1.5): непрерывная запись (stream), кадровая запись (frame) и запись при «вычислении на лету».



Рисунок 1.4 – Поясняющий рисунок к пороговой (а) и беспороговой (б) концепциям записи и обработки АЭ данных.

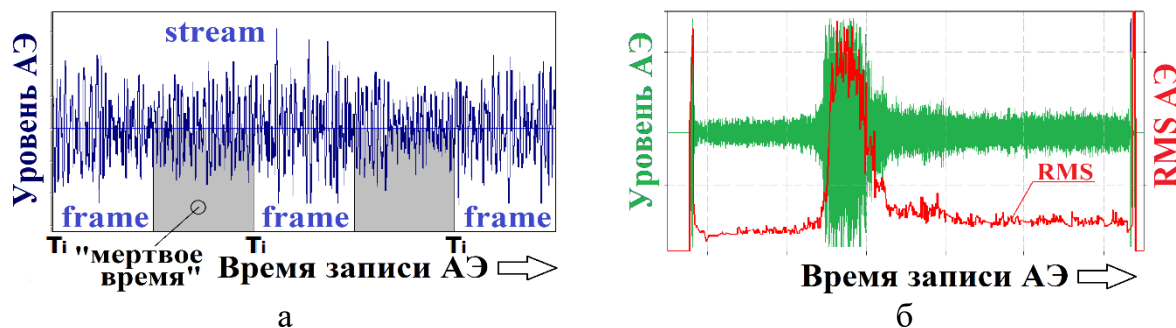


Рисунок 1.5 – Пример stream, frame записи АЭ (а) и (б) записи АЭ при «вычислении на лету» параметра RMS (среднеквадратичное значение сигнала).

Запись stream – полная запись волновой формы АЭ кадрами без пропусков. Если кадры АЭ записываются через заданный период времени $T_i = \text{const}$ (стробирование) или через «мёртвого времени» аппаратуры ($T_i \neq \text{const}$), то такая запись АЭ называется кадровой. Кадровая запись волновой формы АЭ приводит к частичной потере первичной информации. При «вычислении на лету» аппаратура АЭ обчисляет и сохраняет только ограниченное число параметров, рассчитываемых в пределах плавающего окна (кадра) без сохранения её волновой формы. Таким образом все три способа беспороговой записи АЭ сводятся к кадровой ее регистрации и обработки. Однако, в отличие от амплитудного порога, все беспороговые способы имеют одну общую проблему в виде дополнительной необходимости применения алгоритма выделения сигнала из шума. Без которого невозможно установить ни время прихода сигнала, ни провести расчет других оценочных параметров АЭ.

Характеристики ЭВМ БОИ выбирают под способ регистрации данных, производительность АЦП и количество каналов регистрации АЭ путем сопоставления

таких параметров, как время обработки (быстродействие), емкость оперативной памяти (ОЗУ), время выполнения арифметических операций и т.д. Современные БОИ имеют многопоточное исполнение (многоядерный процессор, каскад ОЗУ и дисков хранения данных), поэтому операционная система ЭВМ автоматически регулирует загрузку устройств и автоматически распараллеливает выполнение задач повышая общую производительность. По требованиям, выставляемым к указанным выше передовым платам АЦП их производители рекомендуют следующие характеристики ЭВМ БОИ: многоядерный процессор с тактовой частотой не менее 2 ГГц; ОЗУ не менее 4 Гб; жесткий диск (раздел) емкостью не менее 20 Гб для работы операционной системы и не менее 300 Гб для хранения АЭ данных. В качестве интерфейса передачи данных передовых АЦП используется последовательная шина PCI Express (PCI-e), обеспечивающая высокую скорость передачи данных (до 32 ГТ/с), гарантированную полосу пропускания (QoS), управление энергопотреблением и контроль целостности передаваемых пакетов данных.

Максимально полная Stream-запись АЭ стала возможной в последнее время благодаря высокому быстродействию современных ЭВМ, появлению возможности накапливать, хранить, передавать и обрабатывать большие массивы данных за короткое время. Однако переход на новый уровень требует и разработки новых подходов к фильтрации, сортировке и обработке большого количества АЭ данных, повышению помехоустойчивости метода, и, самое главное, к поиску связей между регистрируемыми акустическими сигналами и протекающими процессами, приводящими в конечном итоге к критическому состоянию объекта контроля. Данные задачи возложены на программное обеспечение (ПО) БОИ, где сейчас наблюдается провал для беспорогового режима записи. Существует ПО управления беспороговой записью и просмотром «сырых» АЭ данных. Алгоритмы и программы анализа и оценки АЭ данных записанных в беспороговом режиме находятся на стадии разработки, что подтверждает актуальность выбранного направления исследований.

Между тем роль ПО в современных АЭ системах давно вышла на передний план по сравнению с аппаратной частью, т.к. именно ПО определяет возможности и диапазон использования АЭ системы. При этом из-за высокой интеллектуальной составляющей ПО БОИ при его разработке применяют средства унификации программирования, в частности, типовые алгоритмы, программы задач, пакеты прикладных программ и т.д. Поэтому ПО АЭ систем выполняется на базе широкодоступных платформ программирования с последующим компилированием в самостоятельную и независимую специализированную подпрограмму.

Программное обеспечение всех известных АЭ систем можно условно разделить на три части: внутреннее ПО, программные средства и внешнее ПО. Внутреннее ПО включает в себя: операционную систему (ОС), системы программирования и тесты проверки исправности работы устройств ЭВМ. Программные средства – это подпрограммы, утилиты и библиотеки нижнего уровня, такие как типовые алгоритмы, программы задач, пакеты прикладных программ, связанные с конвертацией и передачей информации и т.д. Внешнее ПО – это специализированные модули и утилиты, представляющие в совокупности пакет АЭ подпрограмм: ввода-вывода данных, алгоритмы расчета и обработки результатов контроля, передачи данных по каналам связи, сортировки, корректировки информации и т.д. При создании внешнего ПО используется модульная система в которой подпрограммы работают под управлением общей оболочки – графический интерфейс пользователя [108]. В зависимости от уровня проработки каждое ПО содержит разный набор средств анализа данных реализуемых в виде подпрограмм (модулей), которые вызываются оболочкой. При этом работа части подпрограмм (модулей) автоматизирована, а часть нет и требует участия оператора. Результаты записи и обработки данных ПО каждой АЭ системы сохраняет в «свой» формат, что делает невозможным обработку и перепроверку полученных результатов с помощью ПО других АЭ систем, а также универсальными средствами анализа данных типа математических пакетов MathLab, Octave, LabView, Python и др. Последнее сдерживает развитие метода АЭ, т.к. не позволяет применить к реальным АЭ данным передовые математические алгоритмы, которые в первую очередь реализуются в обозначенных универсальных математических пакетах. Однако в аппаратуре последнего поколения в выгрузке АЭ данных также наблюдается стремление к унификации и уже большинство ПО последних версий позволяет выгружать АЭ данные в универсальных форматах (*.txt, *.xls, *.csv, *.wav, *.pcm и др.), что снимает ограничение на возможность их дальнейшей обработки передовыми математическими алгоритмами. Таким образом ПО современных АЭ является очень гибким инструментом и позволяет проводить его модернизацию / улучшение (upgrade) путем добавления программных модулей с алгоритмами нового поколения, которые доказывают свою эффективность на реальных АЭ данных при моделировании задач в универсальных математических пакетах.

1.5. Анализ проблем применения акустико-эмиссионного контроля на современном этапе его развития

Первая проблема применения метода АЭ связана с зависимостью чувствительности контроля от внешних условий (уровня фоновых акустических шумов). Под чувствительностью контроля при этом понимается минимальный размер источника акустический сигнал от которого может быть зарегистрирован [4]. На рисунке 1.6 представлены результаты известных оценок чувствительности АЭ аппаратуры от размера источников разрушения материалов разного вида (масштабного уровня) и скорости их развития (несущей частоты).

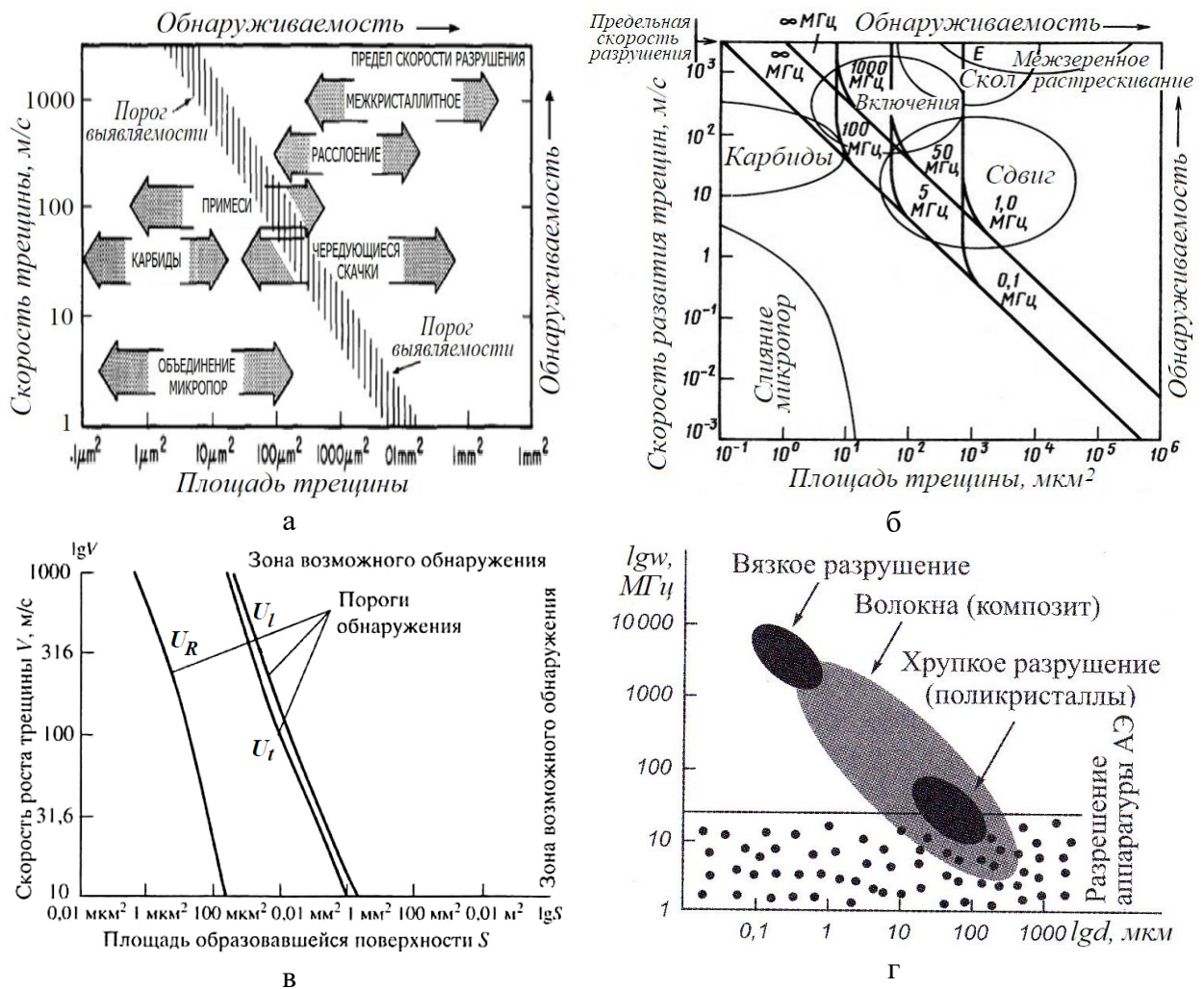


Рисунок 1.6 – Диаграммы различных оценок чувствительности АЭ аппаратуры к трещинообразованию по различным механизмам: (а) в стали при чувствительности ПАЭ по смещению 10^{-13} м установленного на расстоянии 0,1 м от источника [109]; (б) в стали при чувствительности ПАЭ 10^{-13} и 10^{-14} м установленных на расстоянии 0,4 м от источника [96]; (в) в стали при чувствительности ПАЭ по смещению 10^{-13} м установленного на расстоянии 0,1 м от источника [110, 111]; (г) несущая частота w АЭ в зависимости от масштаба элементарного акта разрушения d [112].

В теоретических и экспериментальных работах [6, 96, 109–112 и др.] выполненных с различной долей точности показано, что при развитии трещиноподобных повреждений (наиболее опасных для конструкции) масштабный уровень повреждения d связан с амплитудой акустического импульса A , как $A \sim k \cdot \Delta d^{1,42} \dots k \cdot \Delta d^2$, где: k – коэффициент пропорциональности характеризующий несогласованность скорости разрушения с частотным диапазоном ПАЭ. Результаты пересчета d в A выполненные в [6] и данные рисунков 1.6 сведены в таблицу 1.3.

Таблица 1.3 – Сопоставление масштаба разрушения и уровня амплитуды АЭ по данным литературных источников

Уровень	Описание масштабного уровня разрушения	Размер уровня, d , мкм	Амплитуда АЭ, A , мкВ / дБ
0	Растрескивание карбидных включений/примесей, некоррелированное или мало согласованное движение дислокаций, слияние микропор в вершине вязкой трещины	< 1	< 2 / < 6
I	Образование микротрещин и отдельные локальные пластические явления (образование полос скольжения / двойников)	1...10	2...20 / 6...26
II	Образование мезотрещин и пластическая деформация макрообъемов (выход двойников или макроскопических полос скольжения через весь образец)	10...100	20...200 / 26...46
III	Образование и развитие макротрещин	100...500	200...1000 / 46...60
IV	Образование и развитие магистральных трещин	> 500	> 1000 / > 60

Из таблицы 1.3 видно, что принципиально возможно АЭ обнаружение достаточно широкого класса источников различного масштабного уровня. Технические ограничения, связанные с первичным элементом АЭ системы – ПАЭ (по коэффициенту преобразования и диапазону частот), снижают сферу применения метода (рисунок 1.6). Однако большей проблемой, как было сказано в п. 1.4, является использование амплитудного порога дискриминации, т.к. это приводит к дальнейшему снижению чувствительности контроля. Так минимально (при отсутствии внешних шумов) порог дискриминации может быть равен собственному шуму АЭ аппаратуры приведенному ко входу усилительного тракта, который для промышленных систем по [10, 29] должен быть не более 5 мкВ (14 дБ). Из таблицы 1.3 видно, что в этом случае невозможно обнаружить источники масштабного уровня 0 и половину источников уровня I. При контрольном пороге АЭ системы равном 26 дБ (условие (1.1) полностью невозможно обнаружить источники масштабного уровня

0 и I, а при максимально возможном пороге 40 дБ (условие (1.2) возможно обнаружение только самых мощных АЭ источников III и IV уровней.

Таким образом, чтобы повысить эффективность метода и обеспечить ранее выявление АЭ источников необходимо использовать беспороговый способ записи и анализа АЭ в режиме «stream». Как было показано в п. 1.4 несмотря на то, что АЭ системы реализующие такой способ регистрации данных уже начали появляться в настоящее время практически отсутствуют подходы к детектированию и вычислению основных параметров оценки АЭ сигналов на уровне или ниже уровня окружающих шумов, а также анализа шумоподобных диагностических сигналов АЭ описанных в п. 1.3. Между тем повышение чувствительности аппаратуры с целью обнаружения источников более низкого масштабного уровня (находящихся на ранней стадии своего развития) параллельно увеличивает и количество регистрируемых шумов такого же амплитудного уровня и совпадающей частоты. При этом сегодня шумоподобная АЭ оценивается в режиме «регистрируется непрерывная АЭ» или «нет» [10]. Отсутствие способов и критериев оценки шумоподобной АЭ является *второй* проблемой метода АЭ.

Из рисунка 1.6 также следует, что для обнаружения, как можно большего числа АЭ источников, помимо увеличения чувствительности к минимальному смещению поверхности, следует расширять диапазон рабочих частот, т.е. использовать широкополосную АЭ аппаратуру. При этом приведенные в п. 1.4 выкладки показывают, что повышение частотного диапазона ПАЭ (широкополосное исполнение) приводит к снижению его чувствительности по смещению и наоборот. Так разница чувствительности ПАЭ широкополосного и резонансного исполнения может составлять несколько порядков. Из таблицы 1.3 видно, что эта величина весьма существенна, поэтому согласование параметров контроля для выявления конкретного источника АЭ и подтверждение чувствительности аппаратуры к нему является *третьей* проблемой метода. При этом сам процесс имитации и изучения источников АЭ является *четвертой* проблемой метода.

Четвертая проблема заключается в том, что в настоящее время в методе АЭ нет так называемых «контрольных образцов» имеющихся в других методах НК для настройки аппаратуры и подтверждения ее чувствительности. Поэтому имитация источников для: исследования АЭ, разработки методики контроля и тарировки критериев оценки степени их опасности происходит с применением стандартных схем разрушающих испытаний материалов (в основном на разрыв, сжатие и изгиб). Однако во время эксплуатации (мониторинге) или при АЭ контроле промышленного оборудования условия деградации

и разрушения материала его элементов не соответствуют лабораторным. Поэтому до сих пор остается самым затратным, но наиболее приближенным к реальности вариант исследования АЭ при разрушении объекта контроля с моделированным дефектом [6, 113, АЗ и др.]. Таким образом, верификация методик АЭ контроля также является актуальной задачей.

Кроме этого известно [6, 10, 29, 41, 94, 101 и др.], что для определения координат источников АЭ используется многоканальная аппаратура. Наличие нескольких каналов регистрации АЭ в сочетании с обозначенной выше необходимостью расширения диапазона регистрируемых частот требует повышения частоты дискретизации при аналого-цифровом преобразовании сигналов. Что в сочетании, также обозначенной выше, необходимостью перехода на беспороговый способ записи и анализ АЭ представляет собой гигантский поток непрерывно поступающих данных, который параллельно должен записываться/загружаться, обрабатываться и сохраняться. Так если представить, что верхний рабочий диапазон частот ПАЭ равен 1 МГц. Тогда по теореме В.А. Котельникова / Г.Т. Найквиста - К.Э. Шеннона (Н.Т. Nyquist - С.Е. Shannon) минимальная частота дискретизации равна 2 МГц (т.е. 2 млн. значений в секунду). Пусть при записи АЭ используется стандартная кодировка целых чисел без сжатия типа Int16 в которой объем каждого значения равен 2 байта (2 Б). Тогда в секунду общий объем записи составит 4 Мб, в час – 14,4 Гб, в сутки – 345,6 Гб, в месяц ~ 11 Тб, в год ~ 126 Тб. Далее эти цифры умножаются на количество каналов регистрации АЭ из чего видно, что организация только записи и хранения такого объема данных представляет собой сложную техническую задачу. Несмотря на то, что обозначенная сфера больше принадлежит к информационным технологиям обработки больших массивов данных (так называемой технологии Big Data) организация работы АЭ аппаратуры, хранения и обращения данных, является *пятой* проблемой метода. Которая собственно и привела к появлению пороговых АЭ систем на заре становления метода, когда по-другому технически невозможно было решить такую задачу. В настоящее время уровень аппаратных средств таков, что позволяет перейти как к АЭ мониторингу, так и беспороговой записи АЭ, поэтому проблема обработки больших массивов данных в настоящее время не менее актуальной остальных.

Также известно [6, 114 и др.], что в объекте контроля каждый АЭ сигнал во время распространения от источника к преобразователю претерпевает искажение и затухание. В результате даже в пределах одной антенной группы один и тот же сигнал зарегистрированный каждым ПАЭ будет иметь разную форму и спектральный состав или

может быть зарегистрирован не всеми ПАЭ антенной группы. Поэтому *шестой* проблемой применения метода является выделение АЭ сигналов, принадлежащих одному источнику и одной серии (времени проявления) среди зарегистрированных разными преобразователями данных (включающих шумы, помехи, переотражения и дисперсионные составляющие сигнала).

Все обозначенные проблемы для обнаружения и оценки шумоподобных источников АЭ можно свести к решению задач, которые в общем виде формулируются следующими условиями [6, 16, 20, 114]:

$$\dot{N}_{AЭ}(t) = \dot{N}_1(t) + \dot{N}_2(t) + \dots + \dot{N}_n(t) + \dot{N}_{ш}(t), \quad (1.3)$$

$$S_{AЭ}(f) = S_{AЭ}(f)_1 + S_{AЭ}(f)_2 + \dots + S_{AЭ}(f)_n + S_{AЭ}(f)_{ш}, \quad (1.4)$$

$$S_{AЭ}(f)_i = S_{ш}(f)_i \times H_{AT}(f)_j \times H_{ПАЭ}(f)_j \times H_{ЭТ}(f)_j, \quad (1.5)$$

$$D(t, f) = F(\dot{N}_{AЭ}(t), S_{AЭ}(f)) \leq [D(t, f)] \text{ или } \Delta\tau_{AЭ}. \quad (1.6)$$

В (1.3) ÷ (1.6): $\dot{N}_{AЭ}(t)$ и $S_{AЭ}(f)$ – статистическая и энергетическая характеристика АЭ за какой-то момент времени наблюдения ($t + \Delta t$), где: Δt – время усреднения, f – частота ($f \in \Delta f$, Δf – частотный диапазон регистрации АЭ); $\dot{N}_1(t), \dot{N}_2(t) \dots \dot{N}_n(t)$ и $S_{AЭ}(f)_1, S_{AЭ}(f)_2 \dots S_{AЭ}(f)_n$ – вклад в статистическую и энергетическую характеристику АЭ источников 1, 2 ... n соответственно; $\dot{N}_{ш}(t)$ и $S_{AЭ}(f)_{ш}$ – вклад в статистическую и энергетическую характеристику АЭ источника(ков) шума; $S_{AЭ}(f)_i$ – спектр АЭ сигнала i -того источника ($i = 1, 2 \dots n$); $S_{ш}(f)_i$ – спектральная функция i -того источника АЭ; $H_{AT}(f)_j, H_{ПАЭ}(f)_j$ и $H_{ЭТ}(f)_j$ – соответственно передаточные функции акустического тракта (объекта контроля), преобразователя и электрического тракта j -того канала регистрации АЭ ($j = 1, 2 \dots m$, где m – общее количество каналов регистрации АЭ); $D(t, f)$ и $[D(t, f)]$ – фактическое и допустимое значение диагностического признака дефектного состояния материала/объекта контроля, определяемое на основе функциональной зависимости или модели поведения оцениваемых характеристик АЭ (F); $\Delta\tau_{AЭ}$ – величина возможного увеличения срока службы объекта по показаниям АЭ приборов (подробнее в [6]).

Решение задач (1.3) ÷ (1.6) еще далеки от завершения и являются основной целью работ последнего десятилетия. При этом (1.5) показывает, что сегодня центральное место при обработке АЭ данных занимает спектральный анализ. Это объясняется доказанной связью спектра сигнала со скоростью развития источника АЭ, что позволяет установить его физическую природу [6, 15, 16, 25, 115-124 и др.]. А искажение спектра за время распространения АЭ сигнала в объекте контроля связано с изменением величин ее оценочных параметров во временной и спектральных областях [6, 20, 114]. И хотя, как показано выше, сигналы АЭ являются широкополосными и их спектр выходит за границы

полосы пропускания частот даже современной особоширокополосной АЭ аппаратуры, считается, что основные особенности, уникальные для каждого АЭ источника, будут в некоторой форме присутствовать в АЭ сигнале генерируемого им. Поэтому принципиально возможна идентификация и классификация источников по спектру АЭ сигналов, что положено в основу и настоящей работы.

Выводы по главе 1

1. Метод АЭ единственный метод неразрушающего контроля, который позволяет классифицировать источники по степени их опасности для объекта контроля, поэтому развитие метода является актуальной задачей не только для него самого, но для обеспечения безопасной эксплуатации опасного промышленного оборудования, а именно для использующих его систем: технической диагностики, оценки и управления рисками эксплуатации опасных производственных объектов, а также планирования их ремонта.
2. Раннее обнаружение источника АЭ и его идентификация с минимальной вероятностью ошибки не возможна без анализа и учета непрерывной (шумоподобной) АЭ сопровождающей работу промышленного оборудования. При этом безальтернативно требуется переход с пороговой на беспороговую широкополосную stream-запись и обработку АЭ данных.
3. Шумоподобная АЭ является самостоятельным объектом исследования на базе анализа которой возможна выработка диагностических признаков технического состояния объекта контроля в нескольких направлениях применения (оценка величины течи среды, коррозионных повреждений, износа и т.д.). При этом в основу исследований следует положить спектральный анализ АЭ данных.
4. В настоящее время практически отсутствуют подходы к детектированию и вычислению основных параметров оценки АЭ сигналов на уровне или ниже уровня окружающих шумов и в беспороговом режиме записи АЭ, следовательно, и шумоподобных диагностических сигналов АЭ тоже. Требуются новые подходы к обработке шумоподобных акустических сигналов и выделение из них диагностических признаков или идентификации их источников.
5. Принципиально возможно повысить характеристики средств метода только за счет расширения и совершенствования математического аппарата и алгоритмических решений путем добавления модулей в их программное обеспечение. Это позволяет провести модернизацию / улучшение (upgrade) средств метода только за счет

замены/перестановки его программного обеспечения и способствует ускорению внедрения полученных в работе результатов, как на перспективные (разрабатываемые), так и на имеющиеся уже в эксплуатации средства метода.

- б. В настоящее время остается проблемным вопрос имитации и изучения АЭ источников различного типа, а значит и верификация АЭ методик их обнаружения и оценки (подтверждение чувствительности аппаратуры и алгоритмов обработки данных к источнику АЭ).

Глава 2. Метод иерархического анализа шумоподобных сигналов и сигналов на уровне шума

2.1. Теоретическое обоснование необходимости использования спектральных методов для обнаружения шумоподобных сигналов и сигналов на уровне шума

В п. 1.4.4. Главы 1 в общем виде указаны недостатки детектора АЭ, основанного на применении порога амплитудной дискриминации, поэтому рассмотрим причины пропуска им сигнала или ложного срабатывания подробнее. Любой сигнал в первичной форме представляет собой ряд мгновенных значений выбросов амплитуды (a_i) как непрерывный поток оцифрованных колебаний, генерируемых пьезопреобразователем. В различные моменты времени каждый выброс мгновенной амплитуды (a_i) принадлежит либо шуму (a_{ni}), либо полезному сигналу, наложенному на шум (a_{si}). При этом ни в том, ни в другом случае невозможно предсказать принадлежность мгновенное значение a_i шуму или сигналу, поэтому можно оценить только вероятность принадлежности a_i шуму или сигналу в пределах анализируемого временного интервала. Для этого построим распределение выбросов a_i в кадре записи АЭ, где присутствует шум и сигнал (рисунок 2.1). Очевидно, что данные распределения перекроются полностью в основной своей части и частично, в зависимости от SNR (Signal-to-Noise Ratio или отношение сигнал/шум), по краям.

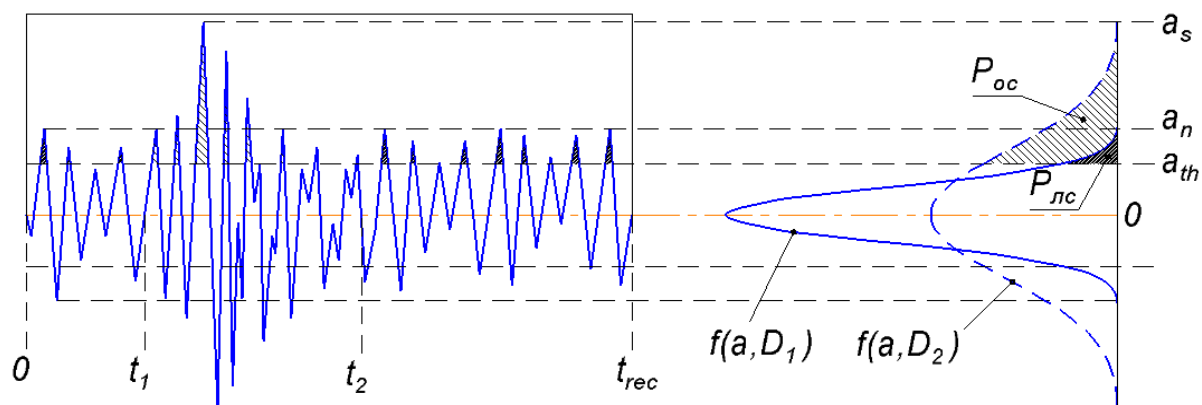


Рисунок 2.1 – Схема оценки $P_{лс}$ и $P_{ос}$ по распределению выбросов амплитуды в одном кадре записи АЭ.

Примем ложное обнаружение сигнала ($a_i = a_{si}$, когда $a_i \subset a_{ni}$), как диагностическое событие D_1 , а правильное обнаружение сигнала ($a_i = a_{si}$, когда $a_i \subset a_{si}$), как событие D_2 . В итоге в амплитудной области (рисунок 2.1) вероятность наступления событий D_1 будет иметь распределение в виде $f(a, D_1)$, события D_2 , соответственно, $f(a, D_2)$, а область их пересечения будет представлять неопределенность принятия решения определяющее

вероятность детектирования ложного сигнала ($P_{лс}$) и вероятность пропуска сигнала от дефекта ($P_{пс}$).

Предположим, что на детектор амплитудной дискриминации уровнем (a_{th}) поступает временная запись АЭ в пределах которой имеется сигнал максимальной амплитуды (a_s) на фоне шума максимальной амплитуды (a_n). При определенной длительности кадра t_{rec} в условиях обеспечения широкополосной записи АЭ, в соответствии с центральной предельной теоремой, можно предположить нормальную плотность распределения выбросов амплитуды в шуме. В условиях низкого соотношения SNR сигнал в кадре записи имеет сопоставимый шуму масштаб (не сильно доминирует), поэтому также можно предположить и в сигнале близкий к нормальному закон распределения выбросов амплитуды, тогда:

$$f(a_i)_n = N(\mu_1, \sigma_1^2) \text{ и } f(a_i)_s = N(\mu_2, \sigma_2^2), \quad (2.1)$$

где: μ_1, σ_1^2 и μ_2, σ_2^2 – соответственно математическое ожидание и дисперсия распределения амплитуд шума $f(a_i)_n$ и сигнала $f(a_i)_s$, N – обозначает нормальный закон распределения (Гаусса) амплитуд на временной записи АЭ. После построения амплитудного распределения и его нормировки получаем функции $f(a, D_1)$ и $f(a, D_2)$ в виде вероятности регистрации отсчёта амплитудой $a_i > a_{th}$. Тогда вероятность обнаружения a_i -того отсчета сигнала (число возможных положительных исходов) с применением амплитудных способов детектирования будет определяться разностью площадей $F(a_i > a_{th})_n$ и $F(a_i > a_{th})_s$. Однако, чтобы получить вероятность обнаружения сигнала (P_{oc}), необходимо разделить разность положительных исходов на полное количество возможных исходов, т.е. на сумму площадей $F(a_i > a_{th})_n$ и $F(a_i > a_{th})_s$, что запишется как:

$$P_{oc} = \frac{F(a_i > a_{th})_s - F(a_i > a_{th})_n}{F(a_i > a_{th})_s + F(a_i > a_{th})_n} = \frac{2 \cdot \int_{a_{th}}^{a_s} f(a, D_2) da - 2 \cdot \int_{a_{th}}^{a_n} f(a, D_1) da}{2 \cdot \int_{a_{th}}^{a_s} f(a, D_2) da + 2 \cdot \int_{a_{th}}^{a_n} f(a, D_1) da}, \quad (2.2)$$

С учетом предположения о нормальной плотности распределения сигнала и шума получаем:

$$\int_{a_{th}}^{a_s} f(a, D_2) da = \int_{a_{th}}^{a_s} \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(a-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} da, \quad (2.3)$$

$$\int_{a_{th}}^{a_n} f(a, D_1) da = \int_{a_{th}}^{a_n} \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(a-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} da, \quad (2.4)$$

Поскольку распределения $f(a, D_1)$ и $f(a, D_2)$ центрированы и нормированы, то $\mu_1 = \mu_2 = 0$, $F(a)_n = F(a)_s = 1$. Следует отметить, что благодаря нормировке $F(a)_n = F(a)_s$ к 1 можно нивелировать зависимость оценки P_{oc} : от длины кадра (t_{rec}); от соотношения в нем длительности шума ($0 \div t_1 \cap t_2 \div t_{rec}$) к длительности сигнала ($t_1 \div t_2$), а также от количества

однотипных сигналов, имеющих в кадре и следующих друг за другом без перекрытия. С учетом изложенных допущений получаем решение (2.3) и (2.4) в виде:

$$\int_{a_{th}}^{a_s} f(a, D_2) da = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_2}\right)}{2}, \quad (2.5)$$

$$\int_{a_{th}}^{a_n} f(a, D_1) da = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)}{2}, \quad (2.6)$$

Подставляя (2.5) и (2.6) в (2.2) получаем решение в общем виде:

$$P_{oc} = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)}, \quad (2.7)$$

Из (2.7) видно, что вероятность обнаружения сигнала в шуме (P_{oc}), по сути, определяется двумя группами отношений. Первые определяют близость уровня порога a_{th} к основной части (среднеквадратическому отклонению) распределения значений амплитуды сигнала (σ_2) и шума (σ_1). Вторые определяют наличие выбросов в сигнале (a_s) и шуме (a_n), значительно превышающих основную часть значений распределения амплитуд сигнала (σ_2) и шума (σ_1). Рассмотрим влияние каждой группы составляющих на P_{oc} .

Для оценки влияния отношений первой группы примем, что максимальная амплитуда выбросов в сигнале (a_s) и шуме (a_n) ограничена значением близким к 3σ , а сами σ на основании свойств нормального распределения представим, как: $\sigma_1 = 0,34 \cdot a_n$, $\sigma_2 = 0,34 \cdot a_s$, тогда из (2.7) получаем:

$$P_{oc1} = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_s}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_s}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_n}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_n}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_s}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_s}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_n}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_n}\right)} = \frac{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{0,48 \cdot a_s}\right) - 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{0,48 \cdot a_n}\right)}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{0,48 \cdot a_s}\right) + 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{0,48 \cdot a_n}\right)},$$

$$\text{что после упрощения записывается как: } P_{oc1} = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{25 \cdot a_{th}}{12 \cdot a_n}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{25 \cdot a_{th}}{12 \cdot a_s}\right)}{2 - \operatorname{erf}\left(\frac{25 \cdot a_{th}}{12 \cdot a_s}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{25 \cdot a_{th}}{12 \cdot a_n}\right)}, \quad (2.8)$$

Из (2.8) следует, что группа отношений a_{th}/σ_1 и a_{th}/σ_2 сводится к соотношениям a_{th}/a_s и a_{th}/a_n , т.е. взвешивает разницу сигнал-порог/порог-шум. Результаты расчета P_{oc1} при различных соотношениях сигнал-порог (a_s/a_{th}) и порог-шум (a_{th}/a_n) в дБ представлены на рисунке 2.2а. При этом расчет был ограничен $a_s/a_{th} = 100$ дБ и $a_{th}/a_n = 100$ дБ, как максимальный динамический диапазон, возможный в АЭ системах.

Для рассмотрения влияния на P_{oc} второй группы соотношений примем условие регистрации кадра рисунка 2.1 при $a_{th} = 0$, а также будем считать, что максимальная амплитуда выбросов в сигнале (a_s) и шуме (a_n) может значительно превышать значение 3σ , т.е. $a_s \rightarrow \pm \infty$ и $a_n \rightarrow \pm \infty$, тогда из (2.7) получаем:

$$P_{oc2} = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}(0) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) + \operatorname{erf}(0)}{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}(0) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) - \operatorname{erf}(0)} = 1 - \frac{2 \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)}, \quad (2.9)$$

Из (2.9) видно, что группа отношений a_n/σ_1 и a_s/σ_2 оценивает наличие выбросов сверх основной части (среднеквадратического отклонения) распределения значений амплитуды сигнала и шума. Результаты расчета P_{oc2} по (2.9) при различных соотношениях a_s и a_n по отношению к их σ в дБ представлены на рисунке 2.2б. Аналогично предыдущему случаю расчет был ограничен $a_s/\sigma_2 = 100$ дБ и $a_n/\sigma_1 = 100$ дБ.

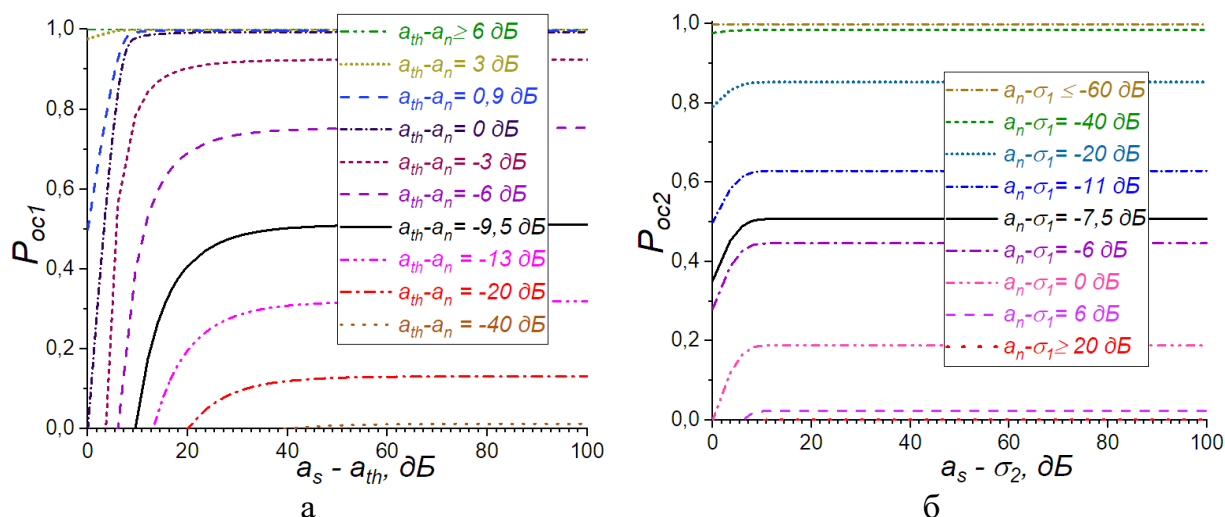


Рисунок 2.2—Зависимости изменения P_{oc1} от a_s/a_{th} и a_n/a_{th} (а) и P_{oc2} от a_s/σ_2 и a_n/σ_1 (б).

Рисунок 2.2а наглядно демонстрирует последствия сбоя в работе порогового детектора в присутствии шума. Например, видно, что события D_1 и D_2 приближаются к равновероятностным ($P_{oc} \rightarrow 50\%$) только при уровне порога $a_{th} = a_n - 9,5$ дБ и уровне сигнала $a_s = a_{th} + 31$ дБ. Причем никаким дальнейшим повышением соотношения a_s/a_{th} нельзя добиться повышения P_{oc} . Если же порог установлен на уровне $a_{th} = a_n - 13$ дБ, то при любом $a_s > a_{th} + 36$ дБ величина $P_{oc} \rightarrow 30\%$, т.е. детектирование сигнала является статистически редким событием. При уровне порога ниже шума, начиная с величины $a_{th} = a_n - 20$ дБ вероятность обнаружения сигнала становится практически невозможным событием ($P_{oc} < 10\%$) независимо от соотношения a_s/a_{th} . В любом случае амплитуда минимально детектируемого сигнала нелинейно смещается в сторону больших величин a_s/a_{th} с увеличением a_{th}/a_n . Если же сигнал на уровне порога ($a_{th} \approx a_s$), то вероятность его детектирования выше 50% (т.е. статистическое событие становится скорее возможным, чем нет) начиная с $a_{th} = a_n + 0,9$ дБ. При $a_{th} = a_n + 6$ дБ и выше гарантированно выявление сигнала при любом a_s/a_{th} , что совпадает с экспериментальными оценками других авторов [125].

Рисунок 2.2б дополняет вышесказанное следующим. P_{oc} начинает превалировать над $P_{лс}$ если отдельные выбросы в шуме не превышают $a_n = \sigma_1 - 7,5$ дБ при $a_s > \sigma_2 + 6$ дБ и $a_n = \sigma_1 - 11$ дБ при $a_s \approx \sigma_2$, т.е. на участках, где отсутствуют высокоамплитудные выбросы шума или спадает общий уровень шума ниже σ_1 , возможно обнаружить сигнал с большей вероятностью, что и используется в способах амплитудного детектирования АЭ после фильтрации [126, 127].

Таким образом, теоретически установлено, что амплитудное детектирование сигналов возможно начиная с уровня порога $a_{th} > a_n + 0,9$ дБ при наличии выбросов амплитуды в шуме не более $a_n = \sigma_1 - 7,5$ дБ при $a_s > \sigma_2 + 6$ дБ и $a_n = \sigma_1 - 11$ дБ при $a_s \approx \sigma_2$ [A5]. В противном случае качественное и устойчивое детектирование сигнала по порогу в амплитудно-временной области анализа АЭ не может быть обеспечено и поэтому следует переходить на использование альтернативных способов обнаружения сигналов в шуме, которыми являются методы оценки разладки временного ряда и спектральные методы [6].

Оценка возможности обнаружения АЭ сигнала в частотной области будет рассмотрена далее, поэтому здесь рассмотрим методы оценки разладки амплитудно-временного ряда, среди которых основными являются (рисунок 2.3): метод CUSUM (CUmulative SUM) [128]; метод фильтрованной производной (Filtered Derivative Algorithm или FDA) [129]; метод Обобщенного Отношения Правдоподобия (Generalized Likelihood Ratio или GLR) или Максимального Правдоподобия (Maximum Likelihood Estimation или MLE) [130]; метод статистики высших порядков (High-Order Statistics или HOS) и его модификации (PAI-K, PAI-S/K, STK/LTK и др.) [6, 131, 132]; метод на основе критерия Акаике (Akaike Information Criterion или AIC) и его модификации [6, 131, 133]; метод скользящего среднего (Moving Average или MA-методы) и его модификации (FMA, GMA, SMA, EMA, WMA и др.) [134, 135]; метод STA/LTA (Short / Long Time Average) и его модификации [6, 136, 137]; метод модифицированного коэффициента энергии (Modified Energy Ratio или MER) [137], фрактальные методы (Variance Fractal Dimension или VFD) [138], прецедентный метод (Case-Based Reasoning или CBR) [139], метод φ -функции [140] и другие [136, 141]. Достаточно подробное описание озвученных методов приведено в указанной литературе, поэтому здесь отметим, что в общем их суть сводится к расчету (по соответствующему алгоритму) некоторого параметра, характеризующего факт изменения (разладки, нестационарности) во временном ряду (амплитудно-временной форме сигнала).

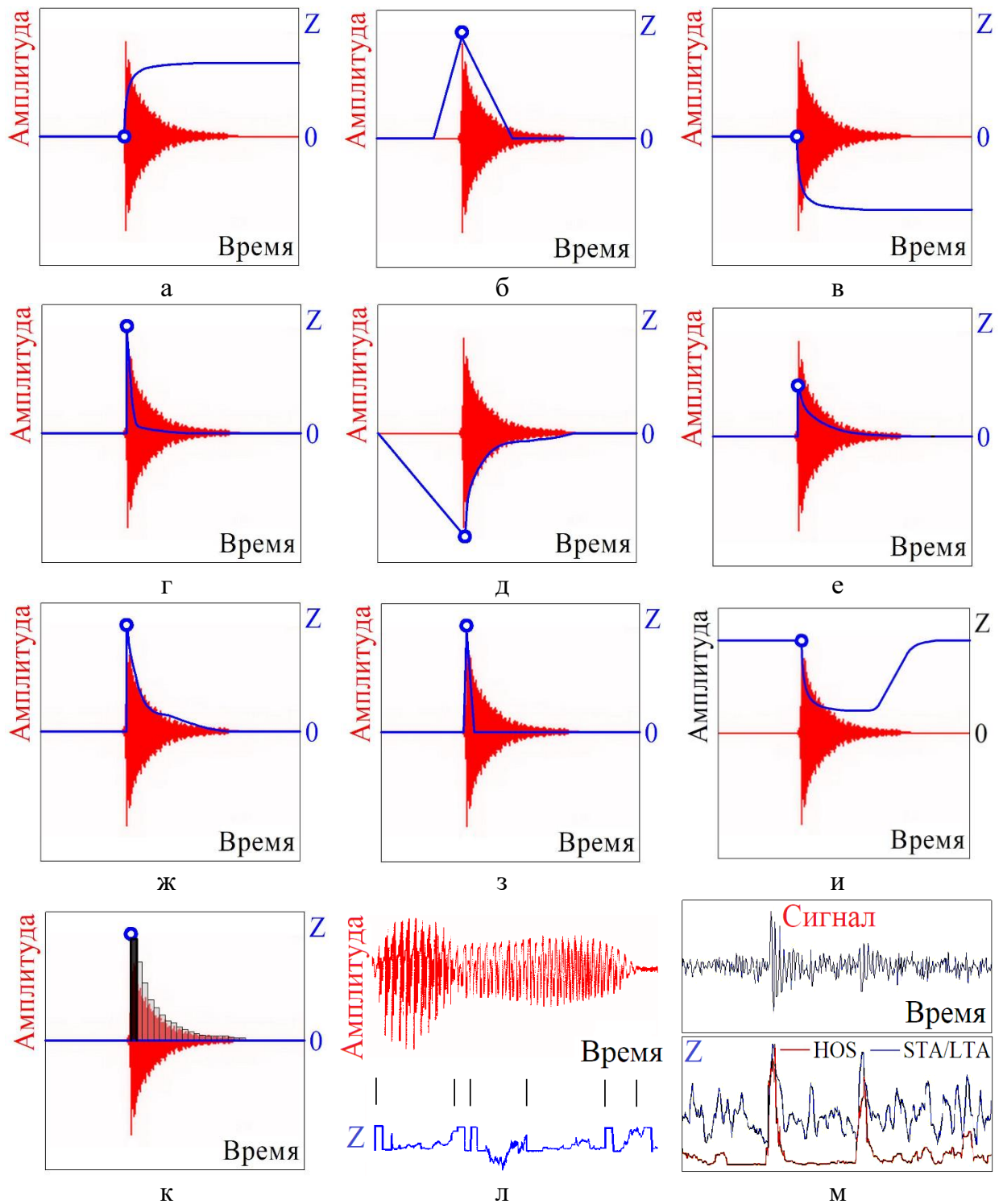


Рисунок 2.3 – Схема изменения контрольного параметра разладки Z (синяя линия) для незашумлённого импульсного сигнала при расчете методами: а – CUSUM, б – FDA, в – MLE, г – HOS, д – AIC, е – MA, ж – STA/LTA, з – MER и ϕ -функция, и – VFD, к – CBR, и шумоподобных и зашумленных сигналов при расчете методами: л – GLR [134], м – STA/LTA и HOS [131].

Обозначим обобщенно для всех указанных методов такой параметр разладки буквой Z . В непрерывном режиме регистрации информации параметр Z считается параллельно поступлению (накопления) данных посредством скользящего окна. Далее по значениям Z

определяют начало сигналов. Схематично результаты изменения параметра Z для импульсного сигнала АЭ при нулевом уровне шума для разных методов расчета показаны на рисунках 2.3а – 2.3к.

Общим недостатком указанных методов является сложность определения длительности скользящего окна для расчета параметра Z . Проблема состоит в том, что в процессе распространения сигналы АЭ претерпевают искажение и трансформации, приводящие к значительному (несколько порядков) изменению времени нарастания переднего фронта и общей длительности сигнала. Поскольку размер скользящего окна является константой, он должен быть для каждого конкретного случая оптимален (индивидуален), подбор которого требует гигантского объема вычислений. Другим недостатком указанных методов является низкая чувствительность к шумоподобным сигналам, которым присуща разладка как между сигналами, так и на границе, и внутри сигнала (рисунок 2.3л), что наблюдается даже на импульсных сигналах по мере увеличения уровня шума (рисунок 2.3м). Это приводит как к ошибкам детектирования сигналов, так и их переразбивке с образованием ложных сигналов [136, 141]. Поэтому все удачные примеры применения указанных методов сводятся к обнаружению сигналов импульсной формы после фильтрации данных [6, 134, 136 и др.]. При этом в работах [140, 142] показано, что спектральные методы могут превзойти амплитудные методы в направлении обнаружения сигналов малой амплитуды при меньшем количестве ложных срабатываний.

2.2. Теоретические основы обнаружения шумоподобных сигналов и сигналов на уровне шума в частотной области

В п. 1.4.4. Главы 1 показано, что при беспороговом режиме регистрации АЭ сигнал и шум регистрируются непрерывными кадрами записи без пропусков. Если источников сигнала и шума независимы, а среду в которой распространяется АЭ от них можно считать линейной, то на основании принципа суперпозиции результирующая функция изменения амплитуды в АЭ кадре записи длительностью (t) будет аддитивна, т.е.:

$$a_r(t) = a_s(t) + a_n(t), \quad (2.10)$$

где: $a_s(t)$ – функция изменения амплитуды сигнала от АЭ источника, $a_n(t)$ – функция изменения амплитуды окружающего шума (или сигнала от второго АЭ источника), $t \in t_{rec}$. Из (2.10) и рисунка 2.4 видно, что: при $a_s(t) < a_n(t)$, $a_r \approx a_n$, $\sigma_r \approx \sigma_n$; при $a_s(t) \approx a_n(t)$, $a_r \approx 2 \cdot a_n$, $\sigma_r \approx \sigma_n$; при $a_s(t) \geq a_n(t)$, $a_r \geq 2 \cdot a_n$, $\sigma_r \neq \sigma_n$, где: a и σ – соответственно амплитуда и среднеквадратичное отклонение распределения выбросов амплитуды в сигнале (индекс

r) и шуме (индекс n). Таким образом, при $a_s(t) \leq a_n(t)$ в параметрах оценки a и σ и связанными с ними сигнал на фоне шума неотличим и АЭ классифицируется, как непрерывная (рисунок 2.4). Последнее говорит о том, что временные параметры в виде времени прихода сигнала (t_1) и его длительности D_s и любые другие производные от них также не могут быть определены. В п.2.1 Главы 2 показано, что для обнаружения сигнала непрерывного вида (рисунок 2.4) невозможно корректно выбрать амплитудный метод обнаружения сигнала на уровне шума, поэтому требуется применение другого подхода.

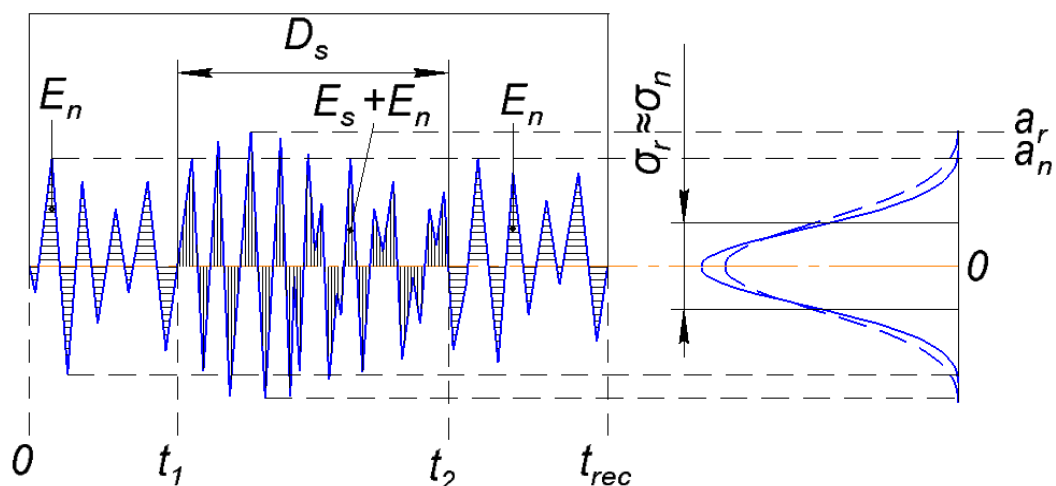


Рисунок 2.4 – Общий вид амплитудно-волновой формы и распределения выбросов амплитуды в кадре записи АЭ при $a_s(t) \leq a_n(t)$.

В работе [143] показано, что возможность обнаружения сигнала произвольного вида зависит только от содержащейся в сигнале энергии E_s и не определяется временной структурой сигнала $a_s(t)$. Для рассматриваемого случая важность данной работы состоит в том, что из нее следуют два основополагающих вывода: (i) обнаруживаемость полезного сигнала не определяется его формой, т.е. сигнал АЭ может быть импульсного или непрерывного вида; (ii) обнаруживаемость полезного сигнала при $a_r \leq 2 \cdot a_n$ зависит от характера распределения энергии сигнала E_s по отношению к шуму E_n . Учитывая, что для шума и сигнала энергия пропорциональна произведению квадрата их амплитуды на длительность, то выражение (2.10) можно записать, как:

$$E_r = E_s + E_n, \quad (2.11)$$

На основании теоремы М.-А. Парсеваля (М.-А. Parseval) имеем взаимное равенство энергии сигнала и шума в АЭ кадре в амплитудно-временной и частотной областях его представления. Следовательно, без потери информации и дополнительных условий переносим анализ возможности обнаружения сигнала по соотношению E_s / E_n из

амплитудной в частотную область. Принимая обязательными условия взаимной однозначности и линейности операторов прямого и обратного частотно-временного преобразования при переходе из амплитудной в частотную область действие принципа суперпозиции сохраняется, поэтому аналогично (2.11) можно записать, что (рисунок 2.5):

$$G_r(f) = G_s(f) + G_n(f), \quad (2.12)$$

где: $G_r(f)$, $G_s(f)$ и $G_n(f)$ – соответственно спектральная плотность мощности (СПМ) функций $a_r(t)$, $a_s(t)$ и $a_n(t)$, $f \in \Delta f$ – частотный диапазон анализа АЭ. Здесь и далее будем рассматривать не амплитудные спектры, а СПМ. Преимуществом применения СПМ является их независимость от соотношения фаз спектральных составляющих при сохранении связи с частотным распределением энергии. Кроме этого, СПМ уменьшает дисперсию спектральной оценки таким образом, что представляет собой спектр своей детерминированной составляющей в виде математического ожидания. При этом сохраняется связь с энергетическим соотношением (2.12), но выражается оно через среднюю мощность:

$$W_r = W_s + W_n, \quad (2.13)$$

W_r , W_s и W_n – соответственно мощность результирующей функции, полезного сигнала и шума вычисленные, как площадь под кривыми $G_r(f)$, $G_s(f)$ и $G_n(f)$ определяемое как:

$$W_i = \int_0^{\Delta f} G_i(f) df, \quad (2.14)$$

где в зависимости от исходной кривой СПМ $i = r, s$ или n .

Выражения (2.10) и (2.12) показывают, что, как бы мы не уменьшали время записи (t_{rec}) и частотный диапазон регистрации (Δf), в случае попадания в кадр записи сигнала в нем всегда присутствует и шум. При этом итоговая кривая СПМ $G_r(f)$ будет по каждой частотной составляющей f превышать кривую $G_n(f)$ на величину $G_s(f)$. Допустим, что шум в кадре рисунка 2.4 является Гауссовским белым, поэтому имеет нормальное амплитудное распределение и постоянный спектр мощности в диапазоне анализируемых частот (Δf), а сигнал близок по форме к прямоугольному заполненному радиоимпульсу, тогда функции их СПМ будут иметь вид, схематично представленный на рисунке 2.5а.

В разное время для разных АЭ источников многими авторами показано [6, 15, 16, 25, 115-124 и др.], что при увеличении энергии источника форма (вид) кривой СПМ АЭ сигналов от него критически не изменяются, а меняется лишь ее положение по координате G (рисунок 2.5а). Эти же работы показывают, что если источник сигнала и

источник шума разные физико-химические процессы, то их кривые СПМ имеют отличимый вид. Поэтому в частотной области, помимо отношения мощностей (энергий) сигнала к шуму для обнаружения сигналов возможно использовать отличительные особенности кривых СПМ $G_r(f)$ и $G_n(f)$ по каждой частотной составляющей f .

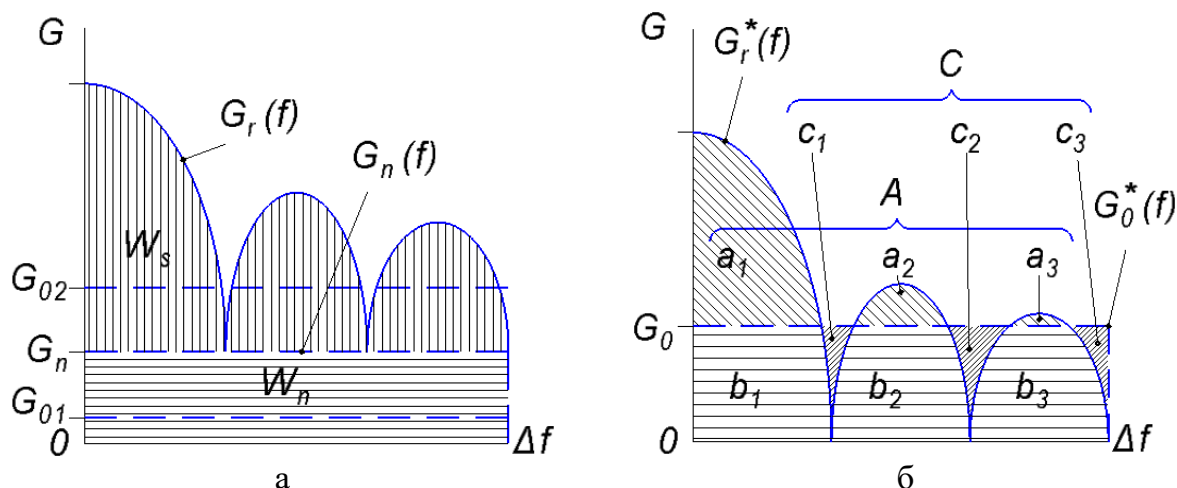


Рисунок 2.5. – Пример отображения кривых СПМ сигнала и плавающего шума до (а) и после (б) нормировки их.

Однако в реальных условиях проведения контроля по кадру АЭ записи невозможно разделить $G_r(f)$ на $G_s(f)$ и $G_n(f)$, а, следовательно, и выполнить расчет W_s и W_n . Получение функции $G_n(f)$ и расчет по ней W_n возможен путем измерения (записи) шума $a_n(t)$ до начала проведения АЭ контроля или после сброса нагрузки во время его проведения. Таким образом, функция $G_n(f)$ по сути является опорной для анализа АЭ, поэтому обозначим её $G_0(f)$. Забегая вперед отметим, что функцией $G_0(f)$ может быть СПМ сигналов от не исследуемых в настоящий момент источников АЭ, если они мешают выделению полезных сигналов от источников, требующих обнаружение. При этом из (2.12) следует, что если выполнить спектральное вычитание из результирующей функции $G_r(f)$ опорную функцию $G_0(f)$, то $G_r(f) \rightarrow G_s(f)$, что используется в спектральных алгоритмах фильтрации и шумопонижения [126, 145-147 и др.]. Данный прием хорошо работает в лабораторных условиях, где возможно обеспечить окружающий шум близко к стационарному виду. Однако в промышленных условиях проведения АЭ контроля шум обычно квазистационарный, поэтому его мощность W_n за время контроля может изменяться, как в большую, так и меньшую сторону и существенно влиять на расчет W_s и W_n . Так, если шум перед АЭ контролем был мощнее, чем в момент регистрации сигнала (ситуация G_{02} на рисунке 2.5а), то ошибка величины W_s будет равна $\Delta W_{02} = W_{02} - W_n$. Если наоборот, опорная запись шума ниже шума в момент записи сигнала (G_{01} на рисунке 2.5а), то W_s будет завышена на $\Delta W_{01} = W_n - W_{01}$. Для того, чтобы результаты оценки W_s и W_n не зависели

от величины мощности шума и сигнала функции $G_r(f)$ и $G_o(f)$ нормируются на их полную мощность, т.е.:

$$G_i^*(f) = G_i(f) / W_i, \quad (2.15)$$

здесь: $G_i^*(f)$ – нормированная функция СПМ, где по аналогии с (2.14) в зависимости от исходной кривой СПМ $i = r$ или o ; W_i – полная мощность, равная площади под кривой $G_i^*(f)$. Таким образом интеграл от $G^*(f)$ по всему частотному диапазону для любых сравниваемых кривых СПМ равен единице:

$$\int_0^{\Delta f} G_i^*(f) df = 1, \quad (2.16)$$

Тогда независимо от мощности шума ($W_n = W_o$, $W_n = W_{o1}$ или $W_n = W_{o2}$) после нормировки их кривые СПМ будут совпадать, т.е. $G_n^*(f) = G_o^*(f) = G_{o1}^*(f) = G_{o2}^*(f)$. Если же сигнал зарегистрирован от источника отличного от источника шума, то на основании данных вышеперечисленных работ, их формы СПМ $G_r^*(f)$ и $G_o^*(f)$ никогда не будут совпадать при $W_r > W_n$ и будут близки при $W_r \leq W_n$, но в любом случае будут наблюдаться площади, где $G_r^*(f) > G_o^*(f)$, и где $G_r^*(f) < G_o^*(f)$. Схематично сказанное для соотношения $G_r(f) / G_n(f)$, показанного на рисунке 2.5а, после нормировки будет иметь вид представленный на рисунке 2.5б. Таким образом, получаем:

$$G_r^*(f) = G_o^*(f) + G^+(f) - G^-(f), \quad (2.17)$$

где: $G^+(f)$ и $G^-(f)$ – соответственно, положительное и отрицательное расхождение между кривыми $G_r^*(f)$ и $G_o^*(f)$. Из рисунка 2.5б и (2.17) видно, что при таком подходе для обнаружения сигнала на фоне шума теряется возможность использования отношения W_r / W_n , но становится более эффективным способ обнаружения сигнала по форме кривой СПМ, т.к. $G^+(f)$ определяет возможность отличить сигнал от шума, а $G^-(f)$ – возможность установить факт присутствия сигнала в шуме.

Однако до регистрации функции сигнала $a_s(t)$ и шума $a_n(t)$ претерпевают искажения и трансформации. Известно [6, 16, 20, 114, 148], что независимо от типа источника АЭ регистрируемый аппаратурой исходный (не подвергнутый обработке) электрический сигнал $u(t)$ в общем виде представляет собой свертку: истинной функции источника $a(t)$ (сигнала или шума), передаточной характеристики среды $s(t)$ и передаточной характеристики измерительной аппаратуры $v(t)$, т.е.:

$$u(t) = a(t) * s(t) * v(t), \quad (2.18)$$

где знак (*) обозначает операцию свертки (конволюция).

Из-за операции (*) обработка и анализ интегрального выражения (2.18) во временной области затруднителен, а в спектральном пространстве имеет преимущество,

т.к. после частотно-временного преобразования на основании теоремы о свертке выражение (2.18) становится алгебраическим, т.е.:

$$U(f, t) = G(f, t) \cdot S(f) \cdot V(f), \quad (2.19)$$

здесь: $U(f, t)$, $G(f, t)$, $S(f)$, $V(f)$ – СПМ $u(t)$, $a(t)$, $s(t)$, $v(t)$. Отсутствие дополнительного аргумента t в функциях $S(f)$ и $V(f)$ показывает, что при регистрации АЭ эволюция регистрируемого сигнала во времени $u(t)$ связана только с функцией источника $a(t)$.

Данное приближение правомерно при условиях:

- а) неизменного положения преобразователя АЭ относительно источника или при минимальном расстоянии от преобразователя АЭ до места концентрации нескольких источников (контроль непротяженных объектов, в которых за время распространения АЭ сигнала не происходит его существенной трансформации (искажения), или контроль заданных наиболее опасных зон объекта, находящихся на фиксированном удалении от преобразователя АЭ);
- б) передача сигнала от источника АЭ до преобразователя проводится через твердое тело (акустический канал), которое не подвергается критическому внешнему воздействию (деформации и/или нагреву);
- в) использование АЭ аппаратуры одного типа (вида) на протяжении всего времени контроля.

При соблюдении обозначенных условий независимость функций $S(f)$ и $V(f)$ от времени дает основание использовать результаты предварительного исследования акустических характеристик объекта контроля и аппаратуры для корректировки функции $U(f, t)$ с целью ее приближения к $G(f, t)$, т.е. выражение (2.19) можно записать, как:

$$U(f, t) = G(f, t) \cdot |H_1(f)|^2 \cdot |H_2(f)|^2, \quad (2.20)$$

где: $|H_1(f)|^2$ и $|H_2(f)|^2$ – соответственно передаточные характеристики акустического тракта и аппаратуры, полученные через оценку их амплитудно-частотных характеристик (АЧХ).

Известно, что передаточные характеристики среды $H_1(f)$ можно получить теоретически [149, 150] или экспериментально [10, 148]. Последнее проще и более точнее, поэтому нашло наибольшее применение на практике и заключается в оценке искажения сигнала, зарегистрированного около места имитации АЭ, после прохождения на некоторое известное расстояние по объекту контроля до мест регистрации АЭ. При этом в качестве имитаторов АЭ в основном используют: источник Су Нельсона, пьезоэлектрический излучатель или удар калиброванного бойка.

Также известно, что передаточные характеристики АЭ аппаратуры $H_2(f)$ определяют (подтверждают) при ее калибровке (градуировке) на специализированных стендах, а элементом аппаратуры, вносящим основной (критический) вклад в искажение акустического сигнала является преобразователь АЭ, для которых проработаны процедуры измерения импульсных и амплитудно-частотных характеристик [96, 151].

Из выражений (2.19) и (2.20) видно, что минимальные искажения $U(f, t)$ возможно получить или сравнительно легко их компенсировать при линейном характере функций $S(f)$ и $V(f) / H_1(f)$ и $H_2(f)$, что возможно добиться при выполнении следующих условий:

- а) использование широкополосной АЭ аппаратуры, имеющей максимально линейную АЧХ в анализируемом диапазоне частот;
- б) установкой преобразователей АЭ максимально близко к источнику;
- в) проведение оценки функций $H_1(f)$ и $H_2(f)$ при температуре преобразователя АЭ и объекта контроля максимально близких к условиям проведения АЭ измерений.

Таким образом, теоретически, при известных $H_1(f)$ и $H_2(f)$ и соблюдении вышеуказанных условий путем оценки подобия изменения спектральных характеристик сигнала $U(f, t)$ имеется принципиальная возможность обнаружить источник АЭ $G_i(f, t)$, а при понимании принадлежности формы $G_i(f, t)$ конкретному типу источника АЭ или шума еще и возможно установить принадлежность регистрируемого электрического сигнала инициирующего его конкретному физическому процессу. Для этого, по аналогии с (2.17), требуется знание опорных кривых СПМ АЭ регистрируемой при действии i -того источника АЭ или шума (помехи), что обозначим как $G_{ori}^*(f)$. При этом, если нормированная СПМ АЭ сигнала от i -того источника $G_{ri}^*(f)$ совпадает или близка по внешним условиям регистрации условиям получения функции-образа того же источника $G_{ori}^*(f)$, то их функции $H_1(f)$ и $H_2(f)$ будут идентичны. Тогда из выражения (2.17) с учетом (2.20) и вышесказанного для любого типа шума и источника АЭ можно в общем виде записать условие его обнаружения, как:

$$G_{ri}^*(f, t) = \pm K_s \cdot \bar{G}_{ori}^*(f, t), \quad (2.21)$$

где: K_s – коэффициент подобия, представляющий собой допуск, в пределах которого СПМ $G_{ri}^*(f)$ по каждой частотной составляющей регистрируемого сигнала признается подобной средней опорной функции СПМ шума или известного источника $\bar{G}_{ori}^*(f)$.

Известно [6, 16, 115], что количество одновременно возможных и параллельно действующих источников АЭ определяется условиями воздействия на объект контроля (внешние факторы), его конструктивными особенностями и техническим состоянием (внутренние факторы). При этом каждый источник АЭ проявляется каждый раз при

формировании внешних и внутренних факторов, способствующих его развитию [152-154]. Также известно, что процессы разрушения (а значит и генерация АЭ) развиваются стадийно и циклически (например, при трении это разогрев-схватывание-отрыв или резание-окисление-скол окисла и т.д. [152-156]). Тогда обозначив время, через которое источник повторно генерирует АЭ, как T условие обнаружения источника АЭ (2.21) можно записать, как:

$$G_{ri}^*(f, t + T) = \pm Ks \cdot \bar{G}_{ori}^*(f, t), \quad (2.22)$$

Выражение (2.22) является основой метода покадрового отслеживания спектрального подобия регистрируемой АЭ заданным опорным кривым, задающих принадлежность к типу источника, требуемого для обнаружения с точностью Ks .

В п.1.3 Главы 1 показано, что источниками шумоподобной АЭ являются несколько одновременно действующих физических процессов, поэтому на основании всех вышеприведенных допущений итоговая функция СПМ источника $G_r(t)$ в месте регистрации колебаний поверхности также будет представлять собой результирующую действия нескольких физических процессов (волновой пакет), т.е:

$$G_r(t) = \sum_{i=0}^n G_i(t), \quad (2.23)$$

где: $G_i(t)$ – соответственно функция СПМ источника $i = 1, 2 \dots n$, а $i = 0$ соответствует ситуации отсутствия действующих АЭ источников, т.е. внешний акустический фон. Однако обозначенное выше положение о том, что каждый источник АЭ активируется и проявляется каждый раз при формировании благоприятных внешних и внутренних факторов логично предположить, что в различные моменты времени T будет иметь место разное перераспределение энергии в СПМ в соответствии с мощностью действующих источников. Тогда учитывая (2.12), (2.13) и (2.17) следует ожидать отличия в форме $G_r(f)$ и величинах W_r , $G^+(f)$ и $G^-(f)$, которое связано с доминированием в результирующем сигнале АЭ признаков то одного, то другого источника. Поэтому возможность одновременного действия нескольких источников должна учитываться при получении опорных кривых $G_{roi}^*(t)$ и в величине коэффициента подобия Ks . В связи с этим, отдельным вопросом, требующим проработки являются методы получения исходных опорных данных при условии одновременного действия нескольких АЭ источников.

2.3. Общий принцип метода иерархического анализа шумоподобных сигналов и сигналов на уровне шума

Выделяя ключевые моменты п. 2.2 Главы 2 имеем следующие положения, на которых основывается предлагаемый метод:

- при формировании одинаковых внешних или внутренних факторов инициируются одинаковые механизмы разрушения или повреждения материала элементов оборудования (источники АЭ);

- единые по физической природе источники и процессы генерируют сигналы АЭ со схожим спектральным составом;

- количество возможных одновременно действующих механизмов повреждения/разрушения (источников АЭ) ограничено и они развиваются стадийно;

- интегральное АЭ излучение в каждый момент времени отражает одно или несколько основных (доминирующих) механизмов повреждения/разрушения, масштаб действия (мощность), которых превалирует над всеми остальными;

- в различные моменты эксплуатации промышленного оборудования (наблюдения) покadroвая оценка подобия спектральных характеристик АЭ может быть использована для поиска источников АЭ, имеющих общее физическое происхождение.

На основании этих положений сформирована первая гипотеза работы, которая состоит в том, что обнаружение АЭ с СПМ подобной опорным кривым сигналам, сопровождающих действие соответствующего механизма повреждения элементов оборудования (источника АЭ) является критической точкой (КТ), требующей принятия решения о техническом состоянии оборудования. Обнаружение АЭ источников выполняется на основе выражения (2.22), но с учетом следующего:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{G_{ri}^*(f, t+T)}{\bar{G}_{ori}^*(f, t)} \geq [Ks], \text{ сигнал АЭ принадлежит } i \text{ источнику,} \\ \frac{\bar{G}_{ori}^*(f, t)}{\bar{G}_{ori+1}^*(f, t)} \leq [Ks], \text{ источники } i \text{ и } i + 1 \text{ различны,} \\ \frac{G_{ri}^*(f, t+T)}{\bar{G}_{ori}^*(f, t)} < [Ks], \text{ сигнал АЭ сопоставить с } i + 1 \text{ источником,} \\ \frac{\bar{G}_{ori}^*(f, t)}{\bar{G}_{ori+1}^*(f, t)} > [Ks], \text{ источники АЭ } i \text{ и } i + 1 \text{ считать одним.} \end{array} \right. \quad (2.24)$$

Здесь $[Ks]$ – обозначает заданное значение коэффициента подобия, которое устанавливается при получении $\bar{G}_{ori}^*(f, t)$, т.е. также является опорными данными. При этом условие (2.24), теоретически, может быть реализовано, как на основе сравнения кривых СПМ, так и на основе сравнения параметрического образа $G_{ri}^*(f, t+T)$ и $\bar{G}_{ori}^*(f, t)$, сформированных в амплитудной и частотной областях. Это обуславливает некую гибкость в выборе вариантов оценки подобия АЭ, но требует отдельного исследования для сравнения и выбора наиболее эффективного из них. Поскольку здесь выражение (2.22), по сути, используется в качестве детектора сигналов АЭ, то после вычисления необходимого параметра классификации X оценка класса опасности источника может

быть проведена по известным критериям [10], что для любого типа критерия можно обобщенно записать как:

$$\begin{cases} X_i \in [x_1; x_2], \text{ то } i \text{ источник } I \text{ класс опасности,} \\ X_i \in (x_2; x_3], \text{ то } i \text{ источник } II \text{ класс опасности,} \\ X_i \in (x_3; x_4], \text{ то } i \text{ источник } III \text{ класс опасности,} \\ X_i \in (x_4; x_5], \text{ то } i \text{ источник } IV \text{ класс опасности.} \end{cases} \quad (2.25)$$

Из (2.24) и (2.25) видно, что предлагаемый метод позволяет установить класс опасности по каждому i -тому типу источника, имеющего заданный опорный признак $\bar{G}_{ori}^*(f, t)$ с точностью Ks . Из этого следует, что для любого параметра (группы параметров) погрешность обнаружения и классификации источников будет определяться количеством ложно обнаруженных сигналов и пропущенных полезных сигналов. Последние, соответственно, определяют вероятность ложного диагноза исправного/неисправного (не опасного/ опасного) состояния объекта контроля. При этом недостоверность обнаружения предшествующих сигналов или их пропуск не может быть компенсирована вновь зарегистрированными или будущими АЭ событиями, т.к. уже при первом очередном АЭ событии может произойти разрушение или недопустимое повреждение объекта контроля. Следовательно, необходима дополнительная проверка результатов алгоритма обнаружения АЭ событий, которую следует проводить параллельно по ранее полученным данным, но альтернативно от первого способа.

В п. 2.1 Главы 2 показано, что в качестве альтернативного признака, подтверждающего наличие в объекте контроля АЭ источника, может выступать закономерность его проявления при формировании идентичных внешних или внутренних факторов. Последнее определяет подобность его проявления при схожих условиях нагружения. Таким образом, отслеживание подобия проявления за один или несколько циклов нагружения также позволяет обнаружить источник АЭ, причем независимо от первого подхода. На основании этого сформирована вторая рабочая гипотеза работы: критические точки, требующее принятия решения о техническом состоянии оборудования, возможно установить на нескольких временных масштабах анализа диагностических данных, которые отличаются только длительностью анализируемого кадра записи АЭ.

Назовем I уровнем установление диагностического события, соответствующего неисправному состоянию оборудования по данным анализа АЭ в масштабе длины кадра записи, сопоставимого с длительностью АЭ сигнала, которое находится по (2.24) и (2.25). Известно [157], что точность установления диагностического события определяется

вероятностью правильного обнаружения дефектного состояния, которую для первого уровня обозначим P_I .

По аналогии назовем II уровнем установления того же диагностического события, но при анализе АЭ в масштабе длительности записи, равной одному повтору изменения условия нагружения, т.е. полному циклу воздействия, а вероятность обнаружения дефектного состояния, соответственно, обозначим P_{II} . Обнаружение источника на II уровне осуществляется аналогично (2.24), но на основе сравнения подобия формы временных функций изменения информативного АЭ $v_{AЭ}(t)$ за цикл воздействия, т.е.:

$$\begin{cases} \frac{v_{AЭi}(t)}{\bar{v}_{0AЭi}(t)} \geq [Ks], \text{ сигнал АЭ принадлежит } i \text{ источнику,} \\ \frac{\bar{v}_{0AЭi}(t)}{\bar{v}_{0AЭi+1}(t)} \leq [Ks], \text{ источники } i \text{ и } i+1 \text{ различны,} \\ \frac{v_{AЭi}(t)}{\bar{v}_{0AЭi}(t)} < [Ks], \text{ сигнал АЭ сопоставить с } i+1 \text{ источником,} \\ \frac{\bar{v}_{0AЭi}(t)}{\bar{v}_{0AЭi+1}(t)} > [Ks], \text{ источники АЭ } i \text{ и } i+1 \text{ считать одним,} \end{cases} \quad (2.26)$$

где: $\bar{v}_{0AЭi}(t)$ – опорные данные в виде средней формы кривых изменения информативного параметра при действии i -того АЭ источника (повреждения). Здесь также $[Ks]$ заданное значение коэффициента подобия, но которое устанавливается при получении $\bar{v}_{0AЭi}(t)$. При этом способ и критерий Ks на II уровне может быть отличен от использованного на I уровне, что определяется типом сравниваемых данных и придает некоторую гибкость предлагаемому методу.

На момент выполнения работы в литературных источниках не установлены АЭ критерии, позволяющие определить класс опасности на II уровне по циклам воздействия, поэтому для реализации предлагаемого метода требуется их разработка. Однако, несмотря на это, видно, что после оценки класса опасности источника на I и II уровнях возникает конфликт формирования единого вывода. Поэтому требуется III уровень установления того же диагностического события, но на котором с помощью заранее заданных правил принятия решения принимается или отклоняется факт наличия дефекта и оценки его класса опасности. Формирование такого вывода требует некоторого набора статистики, поэтому III уровень имеет масштаб длительности заданной наработки оборудования и может составлять отрезки в виде времени наблюдения (минуты, часы, дни, недели и т.д.) или количества полных рабочих циклов. При этом также имеем неопределенность в виде полной вероятности обнаружения дефектного состояния, как P_{III} .

Учитывая, что I и II уровень анализа АЭ используют разные способы обнаружения дефектного состояния и оценки по полному массиву АЭ данных, полученных

беспороговым способом (т.е. без пропусков и потерь информации), а III уровень обобщает их результаты, то последний можно считать результатом многократного АЭ контроля, проведенного на одном и том же объекте контроля. Тогда, согласно [158, А5] для многократно проведенного неразрушающего контроля полную вероятность обнаружения дефектного состояния P_{III} можно определить, как:

$$P_{III} = 1 - (1 - P_I) \cdot (1 - P_{II}), \quad (2.27)$$

Из рисунка 2.6 видно, что предлагаемый подход повышает вероятность обнаружения дефектного состояния при любом ненулевом значении P_I и P_{II} .

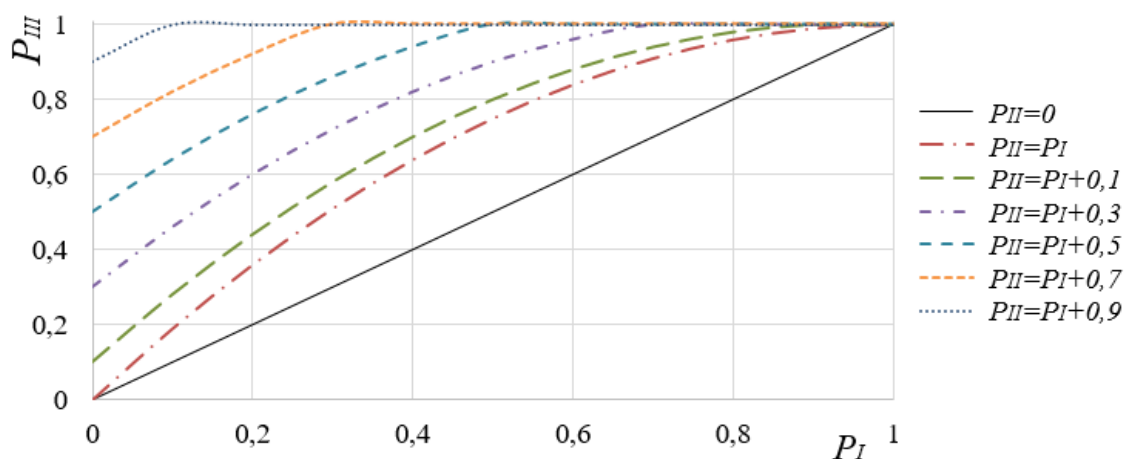


Рисунок 2.6 – Графическое отображение выражения (2.27) относительно P_I .
Относительно P_{II} графики будут аналогичны.

2.4. Обобщенный алгоритм метода иерархического анализа шумоподобных сигналов и сигналов на уровне шума

Исходными данными для реализации настоящего метода являются: коэффициент затухания АЭ волн в материале объекта (δ); максимальное расстояние между ПАЭ в антенной решетке (L); скорость распространения АЭ волн (C); тип конфигурации антенной решетки локации источников АЭ; время задержки между каналами регистрации АЭ (*ИФС* – интервал формирования события) и допуск на максимальный пробег (*ДМП*), т.е. задержку прихода сигналов из-за отклонения формы антенной решетки от «правильной» по причине геометрической кривизны объекта контроля. Перечисленные параметры стандартны для метода АЭ, поэтому перечисляются без описания процедуры их определения. Диапазон анализируемых частот (Δf) выбирают исходя из физических представлений об источнике и особенности затухания АЭ в объекте контроля. Однако для спектрального анализа следует выбирать широкополосные или полосовые ПАЭ с полосой пропускания, перекрывающей Δf . Кроме этого, как показано в п. 2.2 Главы 1, в объем предварительных данных входят опорные данные в виде АЭ признаков шума и сигналов

от основных механизмов повреждения/разрушения объекта контроля. Подробное описание методов получения исходных опорных данных приведено далее в п. 2.5 Главы 2. Основным способом регистрации АЭ является непрерывная беспороговая stream-запись (п. 1.4.4 Глава 1). В условиях периодического срабатывания источника может быть реализована frame-запись АЭ (п. 1.4.4 Глава 1) стробоскопическая (синхронизированная с периодом срабатывания источника) или статистическая (длительное наблюдение через «мертвое время» аппаратуры при нулевом уровне дискриминации). При любом типе записи частота дискретизации (f_d) должна удовлетворять теореме В.А. Котельникова / Г.Т. Найквиста - К.Э. Шеннона, а именно:

$$f_d \geq 2 \cdot f_{max}, \quad (2.28)$$

где: f_{max} – максимальная частота анализа АЭ (верхняя граничная частота полосы пропускания ПАЭ (Δf) или фильтра нижних частот АЭ аппаратуры ($f_{ФНЧ}$)). Длина кадров (фреймов) выбирается так, чтобы при частотно-временном преобразовании обеспечить достаточное спектральное разрешение по частоте (r_f), которое в первом приближении можно определить по следующей формуле:

$$r_f = f_d / 2 \cdot a(t), \quad (2.29)$$

где: $a(t)$ – длина кадра (фрейма) в l -отсчетах аналого-цифрового преобразования ($t=0, 1, 2 \dots l-1$). Учитывая (2.28) и (2.29) для обеспечения требуемого r_f выбирается временная длительность кадра записи АЭ как:

$$t_i \geq a(t) / f_d \geq 1 / (2 r_f), \quad (2.30)$$

Для возможности определения местоположения источника АЭ с помощью алгоритмов локации, основанных на разности времен прихода (РВП) сигналов при покадровой записи и обработке АЭ дополнительно к (2.28) и (2.29) должны выполняться следующие условия:

$$t_i (\Delta t_i) \leq k_i \cdot (ИФС + ДМП) / C, \quad (2.31)$$

$$T_{REC} \geq g \cdot t_V \cdot (ИФС + ДМП) / C, \quad (2.32)$$

где: Δt_i – шаг сдвига кадра (фрейма) при реализации плавающего окна (величина Δt_i должна быть меньше времени задержки между каналами регистрации АЭ, установленной при имитации импульсным источником; при делении записи на кадры плавающим окном $\Delta t_i = t_i$); k_i – коэффициент разрешающей способности по РВП, принимается $k_i < 1$ и характеризует количество кадров (t_i), приходящихся на ИФС, который в общем случае равен расстоянию между ПАЭ в антенной решетке; T_{REC} – время записи амплитудно-волновой формы АЭ или длительность АЭ контроля, необходимая для получения достаточной выборки; t_V – время чувствительного изменения контролируемого процесса

(время падения уровня, давления, время износа и т.д.); g – статистический коэффициент, определяющий достаточность количества выборок данных для построения локационных серий.

Конкретные значения параметров, входящих в условия (2.28) – (2.32) зависят от характеристик используемой аппаратуры и объекта контроля, вида оцениваемого источника АЭ, а также условий проведения АЭ измерений. Поэтому их конкретные значения не могут быть фиксированными, что можно увидеть из каждого примера апробации настоящего метода в Главе 5 и 6.

На I уровне (рисунок 2.7.1) после регистрации stream-запись АЭ и разделения ее на кадры (фреймы) по каждому кадру проводится спектральное распознавание его принадлежности одному физическому источнику по (2.24). Для этого выполняется частотно-временное преобразование (ЧВП) АЭ кадров с расчетом СПМ и, при необходимости, выполняется процедура спектрального шумоподавления. При этом здесь следует обратить внимание на то, что в рамках предлагаемого метода предпочтительными являются алгоритмы, позволяющие не удалить какие-то спектральные составляющие, а выровнять (сделать равнозначными) изменения в спектре по всему Δf , о чем еще будет говориться далее в п. 5.2 Главы 5. Затем, также по каждому кадру рассчитываются необходимые информативные параметры АЭ в амплитудной и частотной области доказавшие свою эффективность для оценки АЭ при выполнении подготовительных работ по п. 2.5 Главы 2. Далее с помощью критерия подобия K_s кадры АЭ объединяются в группы по степени схожести частотных или амплитудных признаков с опорными данными шума и источников АЭ заданных для обнаружения. При этом, как показано в п. 2.2 Главы 2 при использовании в сравнении формы кривых СПМ $G(f)$ они нормируются по выражению (2.15) с условиями (2.14) и (2.16).

В качестве способа и критерия оценки степени схожести (подобия) может быть использован любой из статистических критериев сравнения функций распределения плотности вероятности случайной величины (например, приведенные в Главе 3 или др.), поэтому здесь также мера схожести (подобия) обозначена K_s условно и в общем виде. По условию (2.24) кадры АЭ считаются подобными, если $K_s \geq [K_s]$.

При $K_s < [K_s]$ формируется новая группа. Количество формируемых групп регулируется исходя из значения $[K_s]$ автоматически (путем межгруппового сравнения подобия) или задается оператором исходя из понимания количества возможных источников АЭ. Процедура завершается после закрепления номера группы (кластера) каждому кадру АЭ с созданием спектрального и параметрического образа каждой

группы, которые представляют собой не что иное, как положение центроида кластеров, имеющих подобие спектральных и/или временных признаков.

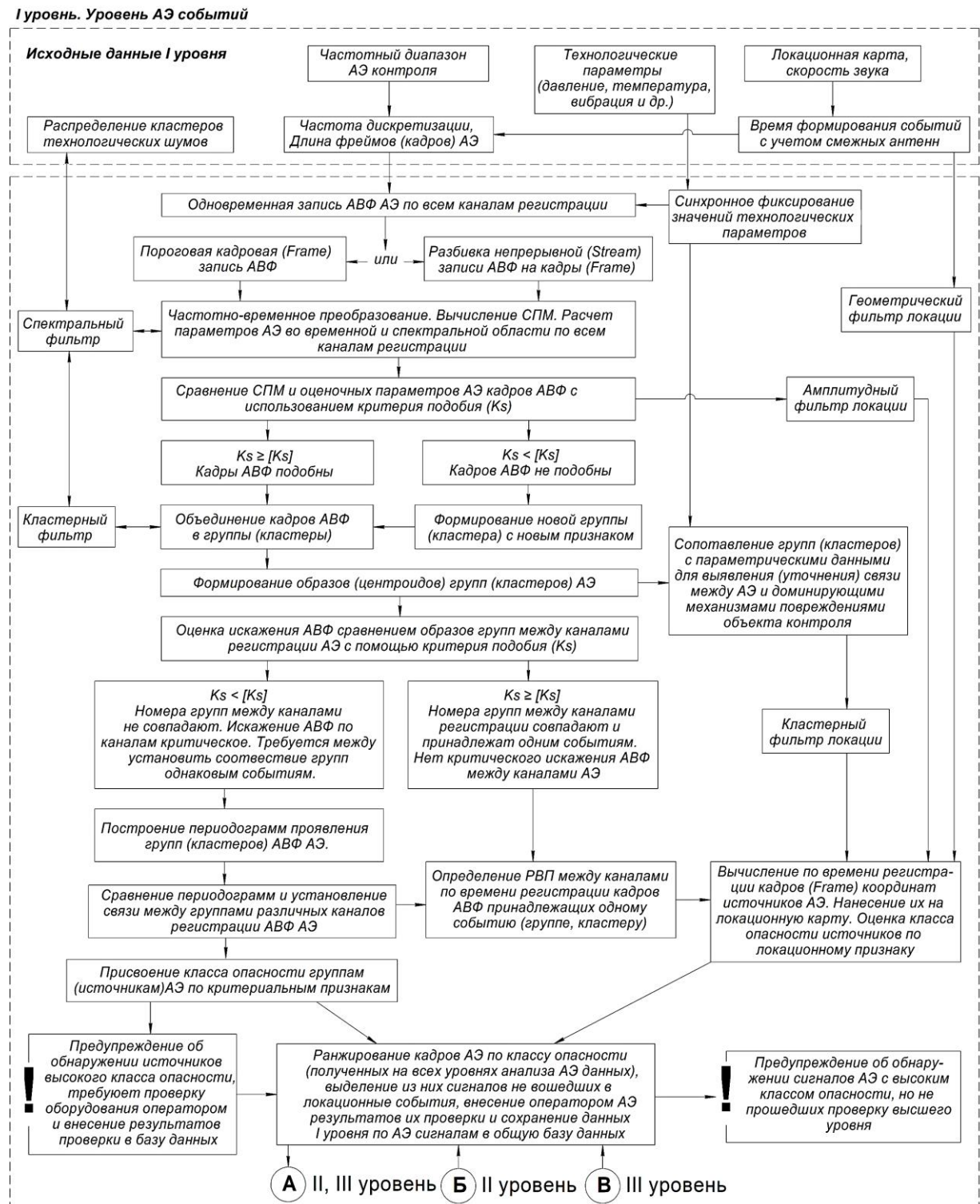


Рисунок 2.7.1 – Общий алгоритм предлагаемого метода обработки шумоподобной АЭ. I уровень анализа данных. Обозначения расшифрованы в тексте.

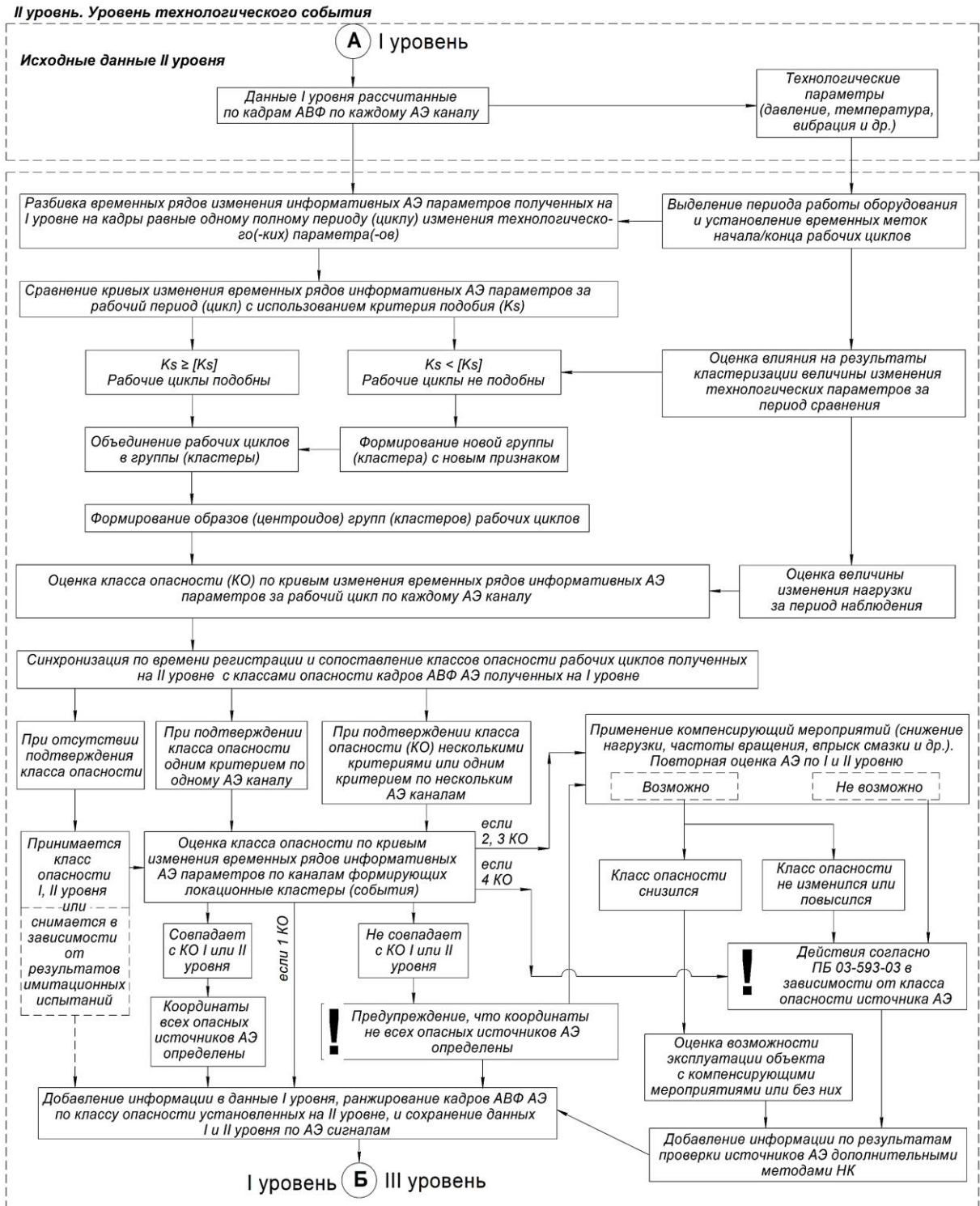


Рисунок 2.7.2 – Общий алгоритм предлагаемого метода обработки шумоподобной АЭ. II уровень анализа данных. Обозначения расшифрованы в тексте.

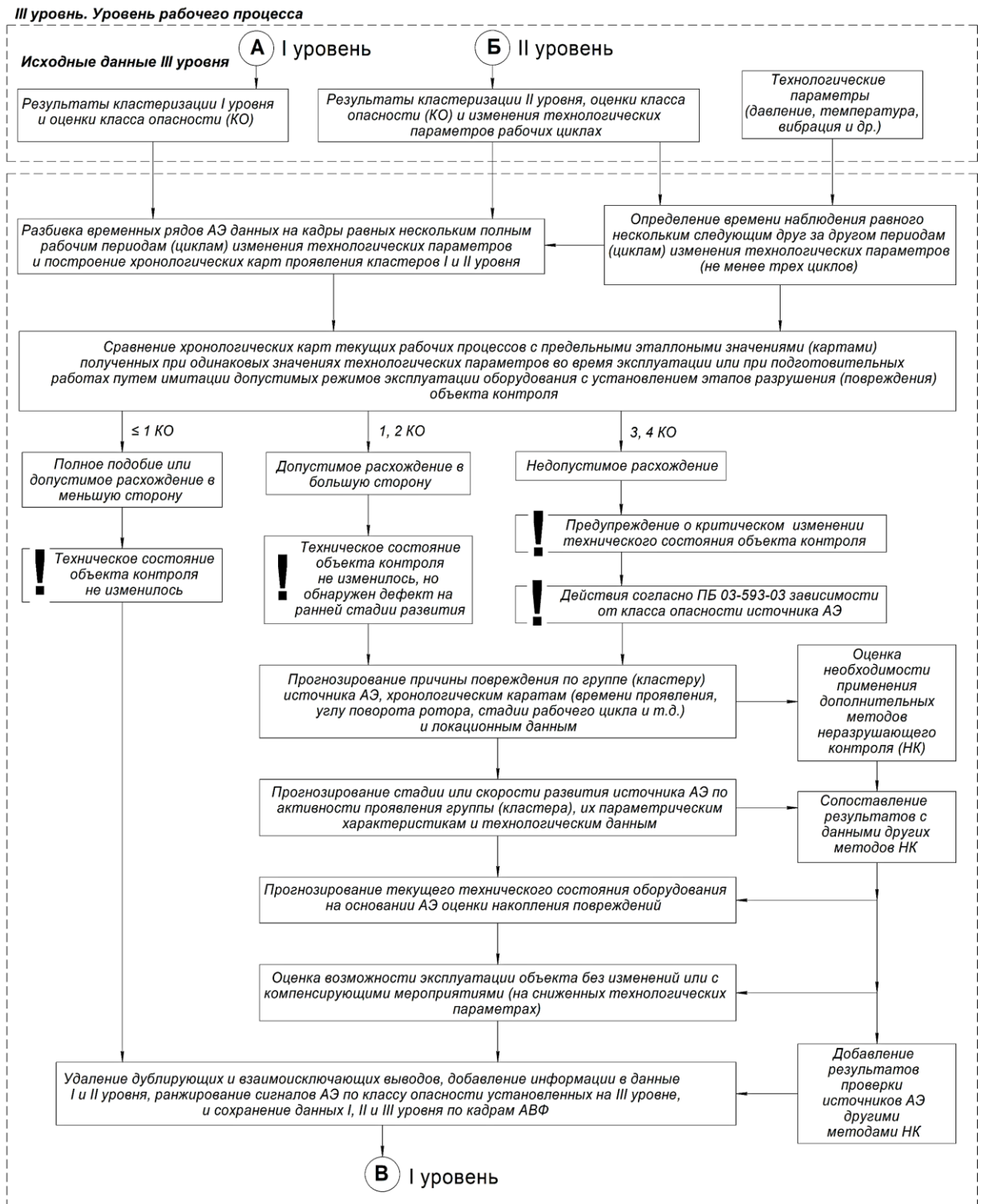


Рисунок 2.7.3 – Общий алгоритм предлагаемого метода обработки шумоподобной АЭ. III уровень анализа данных. Обозначения расшифрованы в тексте.

После кластеризации по ключевым точкам изменения технологических параметров (давление, температура, вибрация и т.д.) проводится уточнение связи между группами (кластерами) АЭ и доминирующими процессами (механизмами) повреждения объекта контроля по методам приведенным в п. 2.5 Главы 2.

Известно, что при распространении АЭ в объекте контроля происходит её искажение и трансформация, которая может повлиять на результат кластеризации одного и того же сигнала, зарегистрированного различными каналами антенной решетки. Оценка влияния искажения формы АЭ на результат кластеризации, проводится также по вышеописанной процедуре с применением критерия K_s , но путём сравнения АЭ между каналами полученных спектральных или параметрических образов групп (кластеров), при «ужесточении» (увеличении) [K_s].

Если в результате сравнения образы групп (кластеров) с одинаковыми номерами, зарегистрированные разными АЭ каналами, признаются подобными ($K_s \geq [K_s]$), то можно считать, что искажения по разным акустическим каналам (акустическим трактам) минимальны (не критические), нумерация кластеров не перепутана. В этом случае алгоритм переходит к определению ключевых параметров методов локации (РВП кадров записи и амплитуды АЭ в них). Если образы групп (кластеров) с одинаковыми номерами зарегистрированные разными АЭ каналами, не признаются подобными, то либо искажение АЭ критическое, либо номера групп (кластеров) перепутаны. Поэтому проводится процедура установления принадлежности групп разных каналов одному событию. Данная процедура и, в частности, модифицированный алгоритм локации источников при покадровой записи АЭ также разработаны в рамках настоящего метода, но описаны в п. 4.3.3. Главы 4, поэтому здесь только обозначается выполнение действия в виде определения координат источников шумоподобной АЭ.

Завершается I уровень классификацией источников АЭ по степени их опасности критериями [10] или др., что в общем задается выражением (2.25). При обнаружении источников высокого класса опасности, требующих проверки оборудования, оператором на экран АЭ системы выводится соответствующее предупреждение. На рисунках 2.7.1–2.7.3 все предупреждения, выводимые на экран АЭ системы обозначены «!». Здесь же на I уровне проводится ранжирование кадров АЭ по результатам оценки класса опасности, связи с технологическими параметрами, определения местоположения источника, полученных на I уровне, а также по результатам перепроверки ранее полученных данных на более высоких уровнях обработки (II и III). Соответственно, при реализации обозначенного метода необходимо применение алгоритмов циклической перезаписи данных в иерархическом формате, например, это файлы типа HDF5 и NetCDF.

На II уровне анализа (рисунок 2.7.2) входными данными являются результаты покадрового расчета информативных параметров в амплитудной и частотной областях. Вид и количество информативных параметров устанавливается в предварительных

экспериментах по методам п. 2.5 Главы 2. Каждый информативный параметр в пределах всего T_{REC} представляет собой дискретный ряд $v_{AЭ}(t)$ описывающий функцию его изменения за время наблюдения с точностью длительности кадра записи АЭ.

Далее, аналогично I уровню, АЭ данные разбиваются на кадры (фреймы), но со следующими отличиями: для разбивки выбирается не кадры записи АЭ, а временные ряды изменения информативных АЭ параметров $v_{AЭ}(t)$ рассчитанные по ним; длительность кадров $v_{AЭ}(t)$ равна не длительности АЭ события, а полному периоду работы оборудования (длительность технологического или оборотного цикла), который обозначим t_{II} . Причем полный период работы оборудования устанавливается по фактической записи изменения технологических параметров (давление, температура, вибрация и т.д.). Для получения состоятельной оценки перед разбивкой на кадры функция $v_{AЭ}(t)$ сглаживается плавающим окном. Итогом разбивки является массив данных $\{v_{AЭ1}(t_{II})_i, v_{AЭ2}(t_{II})_i, v_{AЭ3}(t_{II})_i \dots v_{AЭm}(t_{II})_i\}$, где: m – количество информативных параметров отобранных для анализа, i – порядковый номер рабочего цикла оборудования. При этом массив синхронизирован с рабочими циклами оборудования (изменениями технологических параметров) t_{II} .

Далее, аналогично I уровню, с помощью критерия подобия K_s по (2.26) происходит сравнение кадров $v_{AЭm}(t_{II})_i$ с опорными данными устанавливаемыми по п. 2.5 Главы 2 и деления $v_{AЭm}(t_{II})_i$ на группы (кластеры). Как говорилось выше, здесь критерий K_s также указывается в общем виде, т.к. не нормируется и может быть использован любой из статистических способов и критериев сравнения функций распределения плотности вероятности случайной величины. При этом способ и критерий сравнения может быть отличен от использованного на I уровне.

В зависимости от задачи анализа и особенности АЭ сопровождающей процесс повреждения объекта контроля кадры $v_{AЭm}(t_{II})_i$ перед кластеризацией могут, как нормироваться, так и нет. Если необходимо, чтобы результат кластеризации не зависели от энергии (мощности) АЭ в рабочем цикле, а отображал только изменение формы кривых $v_{AЭm}(t_{II})_i$, то необходимо проводить их нормировку, которая выполняется аналогично процедуре нормирования СПМ, приведенной в п. 2.2. Главы 2 – формулы (2.15) и (2.16). Если необходимо отслеживать приращение энергии (мощности) в каждом цикле, то нормировка $v_{AЭm}(t_{II})_i$ не проводится. Для исключения влияния изменения режима работы оборудования на результат кластеризации параллельно определяется корреляция между изменениями технологических параметров и АЭ данных. При наличии отклонений или нескольких возможных режимов работы оборудования сравниваются

циклы, полученные при идентичных условиях (технологических параметрах работы оборудования).

Итогом кластеризации кадров $v_{AЭm}(t)_i$ является массив образов (центроидов) групп (кластеров) рабочих циклов по каждому информативному параметру $\{C_{m1}, C_{m2} \dots C_{mi}\}$. При этом в процессе разделения отслеживается, либо появление кластера критического вида $[C_{mi}]$, либо достижение предельной величины $[Ks]$, при которой кадры $v_{AЭm}(t_{II})_i$ еще признаются подобными исходному состоянию C_{m0} (допустимое изменение), либо применяются разработанные в настоящей работе критерии оценки класса опасности (КО) источника АЭ по подобию форм кривых $v_{AЭm}(t_{II})_i$ (см. п. 3.7 Главы 3), либо одновременно отслеживается несколько из перечисленных признаков (рисунок 2.8).

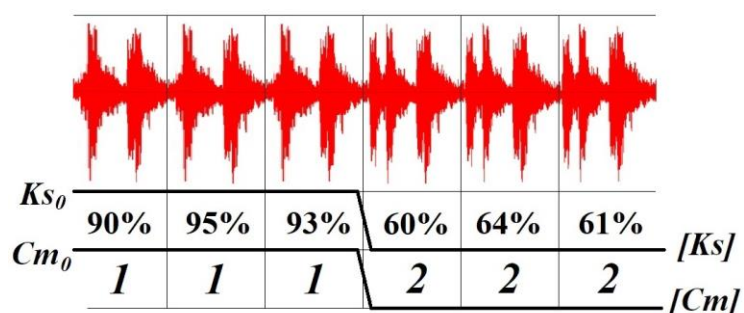


Рисунок 2.8 – Пример идентификации изменения технического состояния оборудования по подобию формы изменения кривых информативных АЭ параметров за рабочие циклы.

Если появление $[C_{mi}]$, наступление $[Ks]$ или присвоение класса опасности рабочему циклу на II уровне приходится на циклы, в которых присутствуют кластеры АЭ высокого класса опасности, установленного на I уровне обработки, то на экран выводится предупреждение о подтверждении класса опасности I уровня одним или несколькими АЭ критериями II уровня. При этом в случае расхождения номера класса опасности, установленного на I и II уровне, то до анализа на III уровне устанавливается наибольший. При получении предупреждения оператору необходимо выполнить заранее разработанные компенсирующие мероприятия в зависимости от класса опасности (в соответствии с [10]), которые в предельном случае заключаются в уменьшении нагрузки на оборудование (сброс нагрузки/давления, снижение частоты вращения, впрыск смазочного материала, включение дополнительного охлаждения и др.) и перепроверки правильности выводов путем повторной оценки АЭ по I и II уровню анализа данных, но на режиме работы оборудования со сниженными технологическими параметрами.

Если возможно выполнение компенсирующих мероприятий и при повторной оценке АЭ по I и II уровню анализа данных на режиме работы оборудования со сниженными технологическими параметрами класс опасности источника не изменился или повысился, то оператором проводятся действия, предусмотренные для каждого класса опасности [10]. Если при повторной оценке АЭ по I и II уровню анализа данных на режиме работы оборудования со сниженными технологическими параметрами класс опасности источника снизился, то проводится оценка возможности эксплуатации оборудования с компенсирующими мероприятиями или без них. Последнее возможно в случае, если повторная оценка АЭ по I и II уровню анализа данных после возврата на прежний режим работы оборудования показала снижение класса опасности источника, т.е. компенсирующие мероприятия (например, впрыск смазочного материала) дали результат.

Параллельно и абсолютно аналогично вышеописанным мероприятиям проводится сопоставление классов опасности, полученных на I и II уровне анализа, но не по всем АЭ данным, а только по входящим в локационные события (кластеры). Итогом выполнения данной процедуры является: во-первых, подтверждение класса опасности по локационным кластерам; во-вторых, подтверждение того, что координаты всех опасных источников, установленных ранее на I и II уровне анализа, определены или не определены, тогда устанавливаются координаты сколько источников и какого класса опасности неизвестны. Эти данные также вовлекаются в вышеописанный цикл сортировки и анализа источников по классу их опасности с выполнением компенсирующих мероприятий.

Если появление $[C_{mi}]$, наступление $[K_s]$ или присвоение класса опасности рабочему циклу на II уровне не приходится на циклы, в которых присутствуют кластеры АЭ высокого класса опасности, присвоенного на I уровне обработки, то возможны два варианта в зависимости от полученных результатов имитационных испытаний оборудования по методам получения опорных данных, описанных в п. 2.5 Главы 2. Первый вариант, если в результате испытаний показано, что наличие определенного кластера АЭ (источника) опасно для эксплуатации или опасно появление признаков нарушения рабочего цикла. Тогда соответственно в первом случае принимается класс опасности источника полученный на I уровне, во-втором, на II уровне анализа данных. Далее АЭ данные обрабатываются, как для описанных выше случаев, когда подтверждается класс опасности I уровня одним или несколькими АЭ критериями II уровня. Второй вариант, если в результате испытаний показано, что не синхронное

появление класса опасности на I и II уровне не представляет опасность, тогда снимается предупреждение о наличии опасного источника, но данные не выводятся из обработки и анализируются в совокупности с поступающими данными на последующих временных интервалах.

Здесь следует выделить, что кластеры исходного C_{m0} и критического состояния оборудования $[C_{mi}]$ или исходная K_{s0} и предельная величина подобия $[K_s]$ или др. признаки класса опасности источников АЭ могут устанавливаться заранее по результатам выполнения имитационных испытаний оборудования по методам получения опорных данных, описанных в п. 2.5 Главы 2. Однако возможно сформировать C_{m0} или K_{s0} в адаптивном режиме, т.е. путем фиксирования АЭ при текущем техническом состоянии оборудования (на момент начала АЭ мониторинга), а далее наблюдается за отклонением от полученных исходных значений до заданных величин $[C_{mi}]$ и $[K_s]$ (обычно превышающих величину разброса значений информативных параметров). Таким образом, метод инвариантен к начальному техническому состоянию объекта контроля, т.е. возможно его внедрение не только от начального (нового) технического состояния объекта контроля, но и с произвольного момента эксплуатации (в котором техническое состояние объекта контроля не известно).

На заключительном этапе II уровня проводится ранжирование и запись в иерархическом формате данных полученных на I и II уровне анализа, в зависимости от присвоенного класса опасности, а также результаты их подтверждения.

Как было отмечено выше, III уровень анализа является уровнем рабочего процесса, включающий в себя несколько выполненных подряд полных рабочих циклов или фиксированный период наблюдения (час, рабочая смена, день). Входными данными на III уровне анализа (рисунок 2.7.3) являются результаты кластеризации АЭ данных и оценки класса опасности источников АЭ выявленных на I и II уровне анализа, синхронизированные по времени регистрации с данными изменения технологических параметров.

Входные АЭ данные разбиваются на кадры (фреймы) длительностью несколько (не менее 3-х) полных периодов (циклов) работы оборудования. При этом на каждом временном отрезке анализа количество (время) фактических полных периодов работы оборудования устанавливается по записи изменения технологических параметров (давление, температура, вибрация и т.д.). Также для получения состоятельной оценки перед разбивкой анализируемых временных рядов на кадры они сглаживаются плавающим окном. Итогом разделения АЭ данных на кадры является построение

хронологических карт проявления кластеров I и II уровня (в виде графиков активности (частоты) проявления кластеров; их бинарных масок; оценочных параметров или спектрограмм во всем частотном диапазоне или по выбранным полосам частот; лента изменения класса опасности источника АЭ и др.) от времени регистрации (номера оборота, угла поворота и т.д.). На рисунке 2.9 для примера приведены три вида из апробированных (см. Главу 6) хронологических карт, это: временная карта проявления кластеров или их АЭ признаков сравнения (рисунке 2.9а); хронологическая карта отношений спектрограмм эталонных (опорных) циклов к текущим рабочим (рисунок 2.9б) и хронологическая лента изменения класса опасности источника АЭ (рисунок 2.9в).

Полученные хронологические карты проявления кластеров в каждом рабочем процессе сравниваются с предельными эталонными картами (контрольными параметрами), полученными при одинаковых значениях технологических параметров во время эксплуатации или при подготовительных работах путем имитации допустимых режимов эксплуатации оборудования по методам получения опорных данных, описанных в п. 2.5 Главы 2, с установлением этапов разрушения (повреждения) объекта контроля и их признаков. При этом способ сравнения хронологических карт зависит от их вида, количества контрольных параметров и диапазона изменения их величин, но, для исключения влияния изменения режима работы оборудования на результат, сравнение рабочих процессов должно проводиться при идентичных условиях (значениях технологических параметров работы оборудования).

Забегая вперед, из практического опыта, приведенного далее в Главе 6, можно отметить, что при наличии АЭ сигналов от источников высокого класса опасности (I уровень анализа) синхронно происходит искажение АЭ образов рабочих циклов (II уровень анализа), поэтому их сопоставление на III уровне анализа приводит, как бы к свертке, в результате которой объединяется дублирующая информация. При этом, если на разных уровнях анализа источник АЭ проявляется с разным классом опасности, то либо принимается класс опасности того уровня, результаты которого были признаны более чувствительными к проявлению источника в предварительных имитационных испытаниях, выполняемых по методам получения опорных данных, описанных в п. 2.5 Главы 2. Даже, если некоторые источники АЭ, находящиеся на ранней стадии своего развития, будут проявляться либо только на I уровне анализа, либо только на II, это на III уровне анализа не приведет к путанице, т.к. будет разведено в хронологических картах по уровням анализа или будет исключен какой-то уровень анализа из обработки, если источник, проявляющийся на нем не интересен для задач выполнения мониторинга или

контроля. Таким образом, на III уровне анализа помимо сравнения с эталонными (опорными) значениями оценочных параметров, происходит удаление дублирующих, взаимоисключающих или спорных выводов с ранжированием оставшихся по степени опасности.

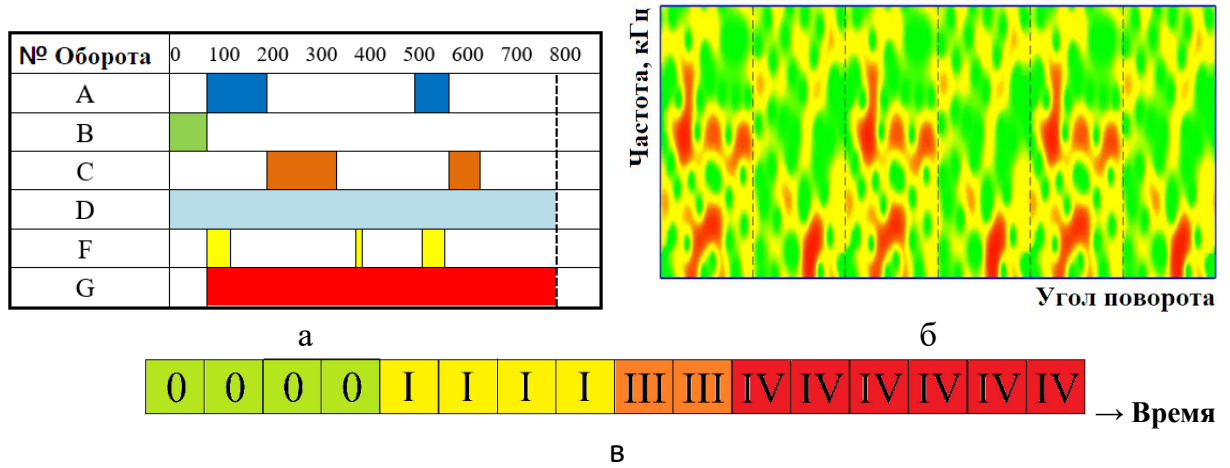


Рисунок 2.9 – Пример: кластерно-временной хронологической карты (а); хронологической карты отношений спектрограм рабочих и эталонных циклов (б) и хронологической ленты изменения класса опасности источника АЭ (в), где: «А,В...Г» – обозначение кластера (или его АЭ признака), «0, I...IV» – класс опасности источника АЭ.

Итогом сравнения хронологических карт рабочих процессов являются три вывода. Первый: «текущие рабочие процессы подобны эталонным». При этом допускается расхождение в сравниваемых оценочных параметрах вплоть до предельного значения 1 класса опасности. Данная ситуация соответствует отсутствию изменения в техническом состоянии объекта контроля. Второй: «текущие рабочие процессы подобны эталонным, но с расхождением сравниваемых оценочных параметров в диапазоне ограниченном допустимыми величинами, установленных для 1 и 2 класса опасности». Данная ситуация также соответствует отсутствию существенного изменения в техническом состоянии объекта контроля, но при этом возможно наличие дефекта (источника) на ранней стадии своего развития. Третий: «текущие рабочие процессы не подобны эталонным с недопустимым расхождением сравниваемых оценочных параметров на величину установленную для 3 или 4 класса опасности». В этом случае техническое состояние оборудование признается критическим и выполняются сначала действия в зависимости от класса опасности источника в соответствии с [10] или разработанные компенсирующие мероприятия, а затем прогнозируется техническое состояние объекта контроля и рассматриваются возможные условия его дальнейшей эксплуатации.

Основанием для возможности прогноза технического состояния объекта контроля дает достаточный объем данных, получаемый при применении настоящего метода анализа, а именно становятся известны текущие: АЭ признаки источников (оценочные параметры кластеров); время начала и продолжительность действия источников соответствующей группы (кластера) за все время наблюдения, а также их координаты (при использовании локации). Кроме этого, количество возможных неисправностей оборудования конечно, и все они или часть основных из них имитируется при выполнении подготовительных работ по методам получения опорных данных, описанных в п. 2.5 Главы 2, т.е. АЭ образы, причины и местоположения большинства видов повреждений или неисправностей становятся распознаваемыми. Поэтому анализ всей совокупности данных в большинстве случаев позволяет предположить вид источника (тип дефекта, повреждения или неисправности) по АЭ данным. А знание активности его проявления и величины оценочных параметров позволяет предположить его стадию или скорость развития (роста) или его масштабный фактор (размеры). Однако точность прогнозирования технического состояния объекта контроля по АЭ данным уменьшается с увеличением количества одновременно действующих источников АЭ. Поэтому в спорных (сомнительных) случаях АЭ оценки и при невозможности разделения нескольких АЭ источников для уточнения результатов применяются дополнительные методы неразрушающего контроля (НК). Для их выбора используется информация об особенностях конструкции объекта контроля и результаты АЭ анализа, а именно: предположительный вид источников (кластер) и место их положения. Конечно, в настоящее время бурно развивается направление создания цифровых двойников (математических моделей) оборудования различного вида. Поэтому, теоретически, в спорных моментах при наличии адекватного цифрового двойника путем моделирования неисправностей и сопоставления их результатов с фактическими выходными диагностическими данными возможно установить первопричину (источники АЭ). Однако последний вариант еще требует глубокой проработки, тогда как первый (на базе применения дополнительных методов НК) уже апробирован и может быть использован уже сегодня.

Таким образом, сочетание обозначенного выше объема получаемых диагностических данных с результатами применения дополнительных методов НК в большинстве случаев достаточно для оценки текущего технического состояния с целью определения возможности дальнейшей эксплуатации объекта контроля на текущих

технологических параметрах (нагрузках) или на сниженных (или с другими компенсирующими мероприятиями), что проверяется на II уровне анализа АЭ данных.

На заключительном этапе III уровня, также проводится ранжирование и запись в иерархическом формате данных полученных на I, II и III уровне анализа в зависимости от присвоенного класса опасности, а также результаты их подтверждения в том числе и с применением других методов НК. Таким образом, даже в случае если будет установлен ранее не известный (не предполагаемый) источник АЭ, то в результате цикла обработки его АЭ признаки будут добавлены в базу образов, что показывает возможность самообучения предлагаемого алгоритма.

Отдельно следует выделить некоторые общие моменты, справедливые для реализации всех уровней обработки АЭ данных предлагаемого метода.

В настоящее время нет математически аргументированных правил к выбору критериев оценки подобия K_s многопараметрических выборок и подбору их величин. Там же было показано, что метрик и способов оценки подобия существует множество, но универсальных из них нет и не может быть, поскольку каждый способ и критерий адаптирован на определенный тип сравниваемых объектов (данных). С другой стороны, это позволяет и упростить задачу путем выбора наиболее подходящего способа и критерия сравнения (подобия) K_s после понимания, к какому типу относится сравниваемый объект (тип данных). При этом граничные величины K_s , K_{s0} и $[K_s]$ в предлагаемом способе устанавливаются эмпирически с применением методов получения опорных данных, описанных в п. 2.5 Главы 2, что будет подробнее продемонстрировано далее Главах 5 и 6.

Для обеспечения согласованности и однозначности действия персонала при наступлении признаков опасности АЭ источников на всех уровнях анализа настоящего метода классы опасности источников АЭ с 1 по 4 приводятся к классификации [10], но соответствуют они не нормам Правил, а этапам разрушения конкретного вида оборудования (объекта контроля), которые устанавливаются в имитационных испытаниях по методам получения опорных данных, описанных в п. 2.5 Главы 2.

Из вышесказанного видно, что предлагаемый метод при каждом применении необходимо адаптировать, как на каждый тип (вид) оборудования (объекта контроля), так и на режим их эксплуатации, поэтому здесь представить более детальное описание предлагаемого обобщенного алгоритма физически не представляется возможным. Однако далее в Главах 5 и 6 будет представлено подробное описание примеров получения

опорных данных и апробации предлагаемого метода с указанием всех ее особенностей, типа критериев оценки и их величин, условий записи АЭ и ограничений реализации по разным видам объектов контроля. Поэтому здесь лишь отметим, что адаптация обобщенного алгоритма на конкретный вид оборудования (объекта контроля) проводится путем оптимизации: количества идентифицируемых его неисправностей; количества необходимых для этого уровней анализа данных; количества диагностических признаков и диапазонов изменения их значений с учетом рекомендаций [62, 159 и др.]. При этом, как видно из рисунков 2.7.1 - 2.7.3, в ядре предлагаемого подхода анализа АЭ данных лежат методы: фильтрации, кластеризации и оценки класса опасности источников шумоподобной АЭ, которые согласно п. 2.2 Главы 2 должны быть основаны на спектральных алгоритмах. В рамках данной работы были проведены акустические исследования нескольких вариантов взаимного применения основных методов обработки АЭ и предложены алгоритмы для реализации и апробации предлагаемого метода. Результаты акустических исследований приведены в Главе 5.

2.5. Методы получения опорных данных для реализации метода иерархического анализа акустической эмиссии при контроле промышленного оборудования

Необходимость наличия опорных данных для реализации предлагаемого метода иерархического анализа акустической эмиссии обоснована в п. 2.2 Главы 2. Кроме этого, опорные данные могут быть использованы и для подтверждения (верификации) работоспособности разработанных решений (в общем случае) или служить оценкой их устойчивости к изменению внешних факторов (в частных случаях). Однако сложность получения опорных данных в АЭ методе состоит в том, что реальная АЭ представляет собой случайный (стохастический) процесс: по времени проявления, виду сигнала (типу срабатываемого источника) и месту его локализации. Поэтому сегодня, верификация алгоритмов анализа АЭ строится на обработке фрагментов реальных или синтезированных записей АЭ с заранее известным количеством, типом сигналов и их временными метками. При этом сигналы в синтезированную запись могут вставляться как искусственно созданные (сгенерированные программно), так и реальные, записанные при АЭ контроле или испытании материалов/изделий. Сегодня такой подход применяется при оценке работоспособности алгоритмов поиска импульсной АЭ при наличии внешних наложенных шумов [127, 140, А4 и др.].

Для шумоподобной АЭ такой подход не приемлем, поскольку из-за сложности ее источников (п. 1.3. Глава 1) синтезирование такой АЭ является сложно реализуемо и

часто молорезультативно поскольку необходимо имитировать не волновую форму и какой-то фиксированный спектральный состав АЭ, а изменяющийся по времени диагностический признак. При этом под диагностическим признаком понимаются любые измеренные или расчетные информативные параметры АЭ позволяющие с определенной вероятностью судить о наличии повреждений (источников АЭ) объекта контроля или о критическом отклонении в режиме его работы, а также отнести объект к одной из категорий, характеризующей класс (степень) опасности его дальнейшей эксплуатации. Поэтому синтезирование шумоподобной АЭ не может ограничиваться коротким фрагментом сигнала, а требует создания временных реализаций их последовательности с перекрытием. При этом в случае необходимости исследования чувствительности алгоритма к конкретному источнику/событию АЭ сгенерировать искусственные сигналы, напоминающие реальные во всем диапазоне проявления шумоподобного источника АЭ, практически невозможно. Также невозможно выполнить синтез шумоподобной АЭ без артефактов сшивки возникающих на границах фрагментов, вставляемых в запись, на которые зачастую «хорошо» реагируют алгоритмы обнаружения сигналов в непрерывном потоке данных, т.к. в точках сшивки происходит разладка временного ряда, и, соответственно, спектральные изменения в широком диапазоне частот. Поэтому верификацию алгоритмов анализа шумоподобной АЭ следует проводить не на синтезированных, а на реальных записях с характерными диагностическими признаками, полученными на объекте контроля, находящемся в каком-то предельном состоянии (критических точках). Однако получение таких данных и установление их связи занимает очень много времени, и в беспороговом режиме записи АЭ требует хранения и обработку большого количества данных. Следовательно, нужны методы и средства имитации шумоподобных источников АЭ для получения диагностических признаков при минимальных временных и аппаратных ресурсах. В рамках настоящей работы были разработаны два подхода получения записи шумоподобной АЭ с диагностическими признаками для динамического и статического промышленного оборудования. При этом под динамическим оборудованием понимаются устройства, машины, механизмы и агрегаты, имеющие в своем составе элементы или узлы совершающие периодические вращательные или возвратно-поступательные движения и нагруженность которых изменяется со временем (подшипниковые узлы, механические передачи, насосы, компрессоры, двигатели и т.д.). Под статическим оборудованием понимается оборудование элементы которого не совершают существенных перемещений (кроме компенсации теплового расширения) и нагруженность которых в рабочем режиме

поддерживается вблизи какого-то номинального значения. Это в основном емкостное оборудование, такое как: сосуды высокого давления, трубопроводы, емкости, сборники, сепараторы, резервуары, колонны и т.д.

2.5.1. Метод получения опорных данных для детектирования критического состояния динамического оборудования

Данный метод заключается в получении опорных данных экспериментально путем проведения многофакторных имитационных испытаний критических ситуаций или режимов работы на исследуемом объекте с применением метода АЭ. В общем такой подход не нов и имеет аналоги, основным недостатком которых является исследование повреждений элементов оборудования и установление причин, инициирующих критические ситуации или режимы его работы только на конец испытания. Отличительной особенностью предлагаемого метода является процедура установления/уточнения причин возникновения критических ситуаций или режимов работы исследуемого объекта непосредственно в момент их возникновения. Что достигается путем отслеживания изменения АЭ во время испытания с его остановкой в момент появления АЭ признака, присущего конкретной критической ситуации или режиму работы исследуемого объекта. Это позволяет провести корректное изучение повреждений элементов оборудования и адекватно установить инициирующие их причины с применением косвенных и прямых измерительных средств непосредственно на момент их повреждения (а не на конец испытания). Кроме этого, за счет применения метода АЭ в качестве обратной связи предлагаемый подход инвариантен к непредсказуемости времени начала возникновения критической ситуации или режима работы оборудования, который невозможно спрогнозировать из-за неповторимости начальных условий даже в случае серии одинаковых испытаний. Также отличительной особенностью предлагаемого метода является процедура получения АЭ признаков критической ситуации или режима работы исследуемого объекта для обучения АЭ аппаратуры.

Рассмотрим подробнее объем и порядок выполнения предлагаемого метода. Обобщенный алгоритм реализации метода представлен блок-схемой на рисунке 2.10 и состоит из выполнения следующих этапов:

- 1). Определение режимов эксплуатации/испытания динамического оборудования (ДО), который должен быть включен в объем исследований. Выбор методов исследований. В качестве методов исследований используются рабочие режимы ДО или

методы его стандартных испытаний, допущенных для применения: проектировщиком, заводом-изготовителем или нормативными документами, регуливающими безопасную эксплуатацию ДО. Проведение подготовки ДО согласно инструкции по эксплуатации, а также выполнение первичной настройки АЭ аппаратуры согласно инструкции по эксплуатации. Для чего может потребоваться пробное испытание – это испытание, повторяющее основное, но целью которого является установление готовности ДО и АЭ системы к проведению основных испытаний.

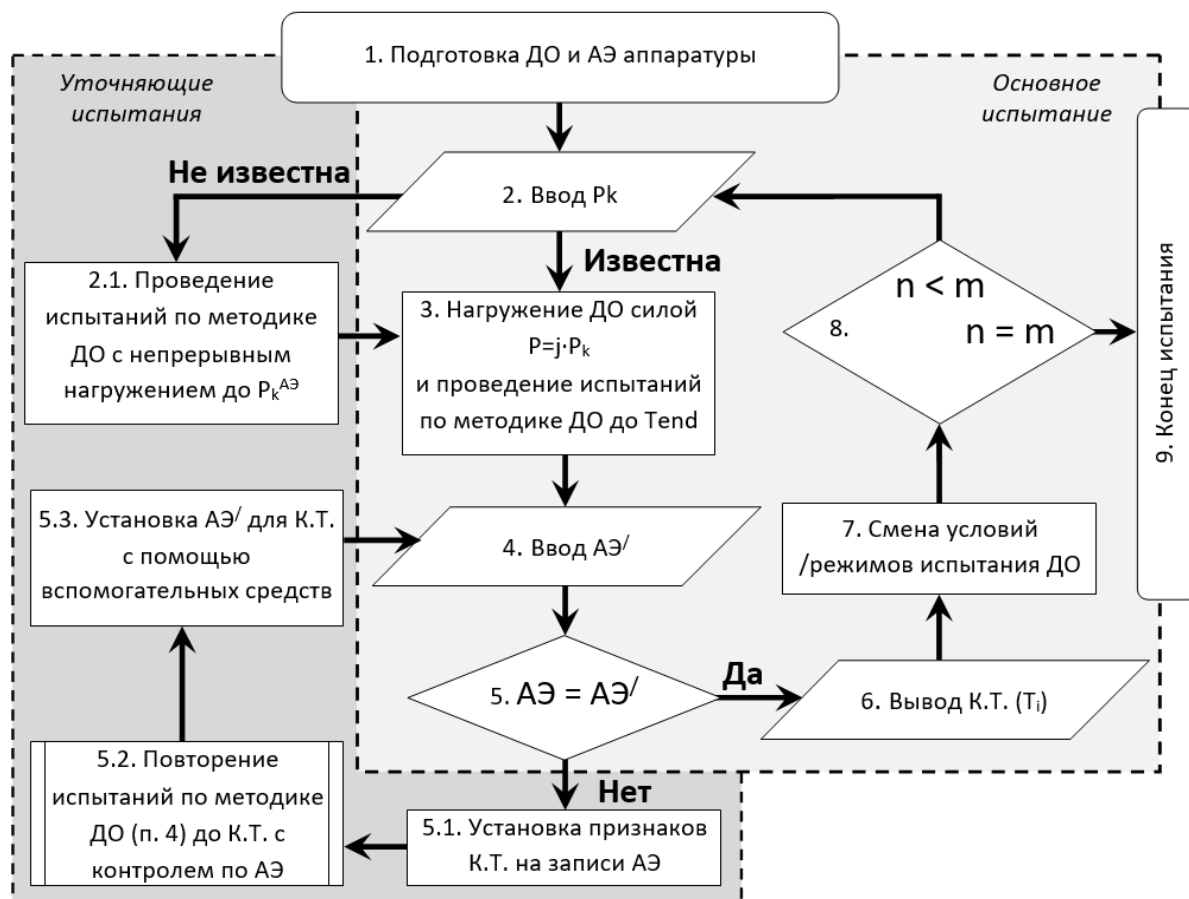


Рисунок 2.10 – Алгоритм определения акустико-эмиссионных диагностических признаков в критических точках технического состояния динамического оборудования. Расшифровка обозначений приведена в тексте.

2). Определение критической нагрузки P_k (критических состояний ДО), которые должны быть включены в объем исследований на каждом выбранном режиме эксплуатации/испытания ДО по пункту 1. Например, для узлов трения это могут быть подварианты имитирующие: смазочное голодание; перегрузку узла трения; нагрев; изменение качества смазочного материала; наличие воды в смазке; изменение геометрии контактных профилей; изменение контактных материалов пары трения и т.д. При этом часто предельные режимы эксплуатации/испытания ДО и критические нагрузки P_k при

них известны и указаны в руководстве по эксплуатации или нормативных документах. Если подобные данные отсутствуют или имеются какие-то затруднения в определении P_k , то проводятся уточняющие испытания по 2.1 (рисунок 2.10).

2.1) Уточняющие испытания выполняются при необходимости, указанной в п. 2 и заключаются в непрерывном нагружении ДО от минимальной рабочей нагрузки до нагрузки превышающей максимальную испытательную (испытательный или близкий к нему режим работы ДО) с параллельной записью АЭ. В каждом таком испытании определяют одну или несколько нагрузок $P_k^{АЭ}$ – это нагрузка P_k , но определяемая по записи АЭ, как соответствующая одному из общих АЭ признаков критических точек (КТ), приведенных далее в п. 4 описания метода или другим.

3). Проведение основного испытания ДО с записью АЭ. При этом длительность испытания (T_{end}) определяется стандартной методикой испытаний ДО, а нагрузка P выбирается из следующего условия:

$$P = j \cdot P_k \text{ или } P = j \cdot P_k^{АЭ}, \quad (2.33)$$

где: j – безразмерный коэффициент понижения испытательной нагрузки. Диапазон изменения $j = 0,7 \dots 0,9$. При длительных испытаниях ДО рекомендуется выбирать значение j ближе к 0,7, а при кратковременных ближе к 0,9. Введение j объясняется тем, что режимы эксплуатации/испытаний ДО на P_k ($P_k^{АЭ}$) сопровождаются неблагоприятными факторами и сопутствующими явлениями (вибрация, разогрев, задир и др.), часто влияющими на ресурс ДО или приводящие к его полному выходу из строя. Снижение P по сравнению с P_k ($P_k^{АЭ}$) позволяет отсрочить время наступления критического разрушения (т.е. позволяет при необходимости вовремя остановить испытание) при этом «заставляет» механическую систему последовательно пройти все стадии, предшествующие критической на одной временной реализации.

4). Определение и ввод ключевых информационных АЭ признаков, которые будут использованы далее для идентификации КТ. Здесь под «АЭ» подразумевается известный параметрический АЭ образ источника или переходного/критического режима эксплуатации/испытания ДО. АЭ, может быть известна из собственного опыта (базы экспериментальных данных сформированных в ходе различных испытаний и исследований ДО) или сформирована по литературным данным. Если АЭ не известна или при испытании с определенной P_k наблюдается несколько следующих друг за другом КТ, то проводятся уточняющие испытания по п. 5.1 ÷ 5.3 (рисунок 2.10), минуя этап сравнения (п. 5). Между тем, в настоящее время уже можно выделить общие АЭ признаки КТ (АЭ)

присущие основным шумоподобным источникам/процессам, которые можно свести к следующим описаниям [A7-A11, A23]:

- плавное повышение (или понижение) среднего уровня параметра оценки АЭ, например, из-за изменения активности сигналов АЭ с близкими амплитудами;
- резкое повышение (или понижение) среднего уровня параметра оценки АЭ, например, при регистрации сигналов АЭ значительно большей (или меньшей) амплитуды;
- повышение (или понижение) дисперсии параметра оценки АЭ, например, изменение сигналов АЭ в большом (или малом) диапазоне значений амплитуд;
- появление высокоамплитудной дискретной АЭ (например, АЭ в виде отдельных высокоамплитудных импульсов на фоне непрерывной АЭ);
- перераспределение энергии АЭ между частотными составляющими спектра записи формы сигналов АЭ или их интегральных параметров оценки;
- многомерные соотношения между различными параметрами оценки АЭ (например, амплитуда/время нарастания или длительность, амплитуда/медианная частота или эффективная ширина спектра и т.д.);
- появление кластеров (групп сигналов АЭ) определенного вида;
- сочетание нескольких приведенных выше АЭ признаков.

5). Сравнение записи АЭ, полученной при сопровождении испытаний ДО по п. 3 метода, с образом критического состояния объекта АЭ^У установленным по п. 4 метода. Сравнение проводится путем оценки степени подобия между формой участков (фрагмента) записи АЭ и образом критической точки АЭ^У. При этом формат оценки подобия может быть проведен в виде сравнения: предельных величин; кластерных признаков; спектральных кривых, полученных на основе любых частотно-временных преобразований; форм статистических распределений и т.д. В качестве критерия подобия АЭ и АЭ^У можно использовать любой статистический критерий (K_s) сравнения функций распределения плотности вероятности случайной величины, а именно метрики: корреляции, аппроксимации (или R-квадрат), Пирсона (С. Pearson), Уитни-Мана (D.R. Whitney - Н. В. Mann), Колмогорова-Смирнова, Кульбака-Лейблера (S. Kullback - R. A. Leibler), Махаланобиса (P. Ch. Mahalanobis) и др. Выбор и конкретная реализация способов сравнения АЭ и АЭ^У представляет собой отдельную задачу, которая в настоящее время имеет множество решений, поэтому ее описание в рамках данного подхода обозначается в общем виде. Однако данная тема еще будет обсуждаться далее при

описании акустических исследований в Главе 5, а также при апробации предлагаемых решений в Главе 6.

Если $AЭ = AЭ'$ в пределах задаваемого Ks , то дальнейшие действия проводятся по п. 6 метода.

Если $AЭ \neq AЭ'$ в пределах задаваемого Ks , т.е. критические стадии отображаются не типично (отлично от известных зависимостей) или однозначно не идентифицируются, то фиксируется время проявления КТ (T_i) на записи основного испытания и проводятся уточняющие испытания по п. 5.1 ÷ 5.3 с целью установления соответствия АЭ признака причине возникновения неизвестной КТ. При этом основными причинами КТ в ДО являются: нарушение условий смазывания; выбор тепловых компенсационных зазоров; процессы физического повреждения элементов ДО; частичный или полный отказ одного из элементов или частей ДО; переходный режим работы ДО и др.

5.1) Описание признака $AЭ'$ (выполняется аналогично приведенным в п. 4 общим описанием АЭ признаков КТ) и условий нагружения ДО при которых он возникает. Также проводится сопоставление с технологическими параметрами или другими параметрами наблюдения (k). Под k могут быть, например, температура, момент или сила сопротивления, давление, величина износа, виброускорение и др.

5.2) Проведение уточняющих испытаний. По сути уточняющие испытания представляет собой полное повторение основного испытания, но с меньшей длительностью ($T_{AЭ}$), которое предположительно устанавливается равным времени до исследуемой критической точки (T_i), полученной по п. 5, т.е. $T_{AЭ} = T_i < T_{end}$. При этом контроль соответствия уточняющего испытания основному за время T_i , минимально проводится по интегральной кривой АЭ. Вид которой и параметров наблюдения (k) должен повторить поведение в точке (T_i) основного испытания. Таким образом, уточняющее испытание номер $<i>$ повторяет основное, но, что важно, останавливается по АЭ в точке $T_{AЭ}$ удовлетворяющей следующему условию:

$$T^{AЭ} < i > = \begin{cases} AЭ(T^{AЭ}) = AЭ'(T_i), \\ T^{AЭ} = T_i, \\ k(T^{AЭ}) = k(T_i). \end{cases} \quad (2.34)$$

В случае если время существования КТ мало или инерционность средств испытания не позволяет остановить уточняющее испытание в точке КТ $T_{AЭ}$ с выполнением (2.34), то соответствие АЭ признаку КТ устанавливается по двум уточняющим испытаниям, имитирующим предшествующее и последующее состояние трибосистемы вблизи КТ, а

условие испытаний (2.34) для них переписывается, как (2.35), которое уже будет содержать не одно, а два условия соответствующее первому и второму испытанию:

$$T^{AЭ} < i.1 > = \begin{cases} AЭ(T^{AЭ}) = AЭ'(T_{i-1}), \\ T^{AЭ} = 0,8 \dots 0,9 \cdot T_i, \\ k(T^{AЭ}) \leq k(T_i). \end{cases} \quad (2.35.1)$$

(2.35)

$$T^{AЭ} < i.2 > = \begin{cases} AЭ(T^{AЭ}) = AЭ'(T_{i+1}), \\ - \\ k(T^{AЭ}) > k(T_i). \end{cases} \quad (2.35.2)$$

5.3) Установление причин возникновения критического режима работы ДО (КТ) с применением вспомогательных средств, среди которых: разборка ДО; измерение геометрии частей; микроскопические исследования контактных поверхностей и т.д. Результатом выполнения п. 5.3 должно быть закрепление за новым критическим образом АЭ технической причины, его вызывающей.

б) Фиксирование: причины возникновения КТ, условий испытаний, сопутствующих явлений, сочетания инициирующих КТ факторов по каждой временной точке (T_i) на каждой записи АЭ (по каждому испытанию), имеющей признак КТ, где: $i = 1, 2, 3 \dots$

7, 8 и 9) Изменение условий/режимов нагружения ДО или вида основного испытания для достижения других КТ. Каждый вариант КТ на рисунке 2.10, обозначен как n ($n = 1, 2, 3 \dots$), а общее количество вариантов КТ, определенных для исследования в п. 2 метода, как $m = \max(n)$. Однако в зависимости от результатов основных или уточняющих испытаний ДО количество вариантов исследования (m) может быть, как сокращено, так и наоборот расширено. При достижении $n = m$ получены все варианты проявления АЭ позволяющие идентификацию любой КТ возможной на ДО в пределах исследуемого диапазона (вариантов) режимов его нагружения или повреждения.

Итогом выполнения данного метода является запись или массив записей АЭ, на которых по времени точно определены реальные АЭ признаки конкретных КТ или ситуаций возможных на ДО, а также стадийность их зарождения (развития). Кроме этого для каждой КТ или ситуации известны причины, инициирующие конкретный АЭ признак, но при этом записи АЭ не имеют артефактов, присущих синтезированным сигналам. Поэтому они полностью пригодны для использования их в качестве опорных данных для предлагаемого иерархического беспорогового метода анализа шумоподобной АЭ.

Апробация предлагаемого метода, проведенная на машинах трения (п. 5.2 Главы 5), показала, что существует возможность сокращения времени выполнения работ и объема вычислений за счет следующих мероприятий. Для первичного (экспресс) выявления К.Т. по АЭ следует использовать легко рассчитываемые интегральные параметры оценки потока АЭ данных, такие как: огибающая сигнала (a_{es}) и среднеквадратичное значение сигнала (a_{rms}). А более точные АЭ оценки признаков К.Т., например, спектральный анализ (п. 5.2 Глава 5) следует применять только в спорных случаях или ситуациях, когда необходима высокая детализация по идентификации вида доминирующего источника генерации АЭ. Непременным условием при экспресс-выявлении К.Т. должны быть непрерывная регистрация и отображение АЭ параметров в реальном времени (on-line).

Следует подчеркнуть, что данный метод подходит только для оценки КТ и получения опорных данных на динамическом оборудовании, у которого за несколько рабочих ходов (оборотов) набирается достаточная статистика для формирования диагностических признаков. Кроме этого, при реализации метода есть вероятность выхода из строя элемента или части объекта исследования из строя, что для ДО может не быть критичным, т.к. для большинства типов ДО возможен их ремонт с заменой элемента или части. По названным причинам обозначенный метод не подходит для получения опорных данных, характеризующих критическое состояние статического оборудования, где нет характерной периодичности в работе и нет возможности замены части элементов при их повреждении во время испытаний при определении КТ. Поэтому для статических объектов предлагается отдельный метод.

2.5.2. Метод получения опорных данных для детектирования критического состояния статического оборудования

Данный метод также заключается в получении опорных данных экспериментально, но со следующим отличием. Известно [6], что критическое состояние статического оборудования (СО) всецело определяется дефектностью корпусных/несущих элементов и, в отличие от ДО, приближение к нему, практически, никак не сказывается на технологическом режиме работы оборудования (кроме ситуации сквозной течи среды) вплоть до возникновения аварийной ситуации. Поэтому для СО необходимо имитировать не режим его работы, а развитие в материале его силовых элементов конкретного вида дефекта или повреждающего фактора.

Понятно, что лучшим средством имитации АЭ является именно то, в основу действия которого положено физическое явление или процесс идентичный или близкий

к реальному источнику АЭ требуемого для выявления. Такие имитаторы АЭ представляют копии объектов контроля с естественными или искусственными дефектами, которые доводят до разрушения с параллельной записью АЭ. Однако этот подход является опасным (объект во время испытаний может разрушиться непредсказуемым образом), а также экономически не выгодным (после разрушения объекта невозможно его повторное использование). Совершенно противоположным подходом является применение накладных имитаторов АЭ (имитатор Су-Нильсена, пьезоэлектрический излучатель и др.). Однако ими не возможно воспроизвести реальную форму АЭ сигнала, генерируемого дефектом, а также отсутствует связь с напряженно-деформированным состоянием материала с дефектом под заданной нагрузкой. Промежуточным между указанными крайними вариантами является подход имитации АЭ путем разрушения образцов материала объекта на испытательных машинах. При данном подходе, во-первых, применяются дорогие лабораторные испытательные машины, а, во-вторых, используются образцы малого размера, что не позволяет изучить трансформацию, затухание и искажение АЭ, возникающее в реальном объекте и влияние этих эффектов на результат анализа АЭ данных. Подробный анализ основных способов имитации АЭ с применением различных технических средств и приемов проведен в [А4, А26], который показал, что ни одно из известных на сегодня технических решений не позволяет проводить многовариантную имитацию АЭ (более двух различных по природе источников АЭ) максимально приближенной к реальной ситуации контроля или мониторинга технического состояния промышленного объекта без его потери (разрушения объекта). В связи с этим, был разработан безопасный способ и устройство, позволяющее максимально точно воспроизвести условия генерации и распространения акустических волн от нескольких источников АЭ возможных на статическом промышленном оборудовании с минимальными затратами и без его повреждения. При этом основной упор был сделан на основные причины несоответствия технического состояния СО требованиям промышленной безопасности, а именно: наличие трещин; негерметичность; коррозионные повреждения или повреждение агрессивными средами со скоростью выше нормированной. Однако перечисленные имитаторы АЭ универсальны и могут быть использованы и для имитации обозначенных источников АЭ на элементах динамического промышленного оборудования, эксплуатирующихся в схожих условиях (корпуса, баки, картеры, рамы, подрамники и т.д.).

Обозначенный положительный эффект достигается за счет:

1) установки имитаторов АЭ на объект исследований (промышленное оборудование) посредством волноводов, что при разрушении/повреждении имитатора позволяет ввести генерируемую АЭ в объект исследования, но не приводит к его повреждению;

2) имитации АЭ непосредственно на промышленном оборудовании или его копии-макета, что позволяет изучать не только процессы возникновения АЭ, но и эффекты рассеивания, трансформации, отражения и затухания акустических волн на элементах конструкций объекта контроля и в реальных условиях (например, при заполнении сосуда продуктом, заглубление сосуда в грунт и т.д.);

3) использования имитаторов АЭ с системой управления (активации) физического процесса ее инициирующей, которая позволяет задать либо скорость развития дефекта/повреждения, либо уровень генерации АЭ;

4) возможности одновременной имитации АЭ нескольких видов повреждений объекта контроля с наложением внешнего (фонового) шума заданного уровня.

Волноводы для монтажа имитаторов АЭ выполняются в виде пластин, согласованных по толщине и типу материала с основным материалом оборудования (объекта контроля или его макета). Волноводы (2) с одной стороны привариваются к оборудованию (1), а с другой стороны имеется скошенная под 45° кромка с двумя отверстиями универсальными для закрепления имитаторов АЭ различного вида (рисунки 2.11–2.13), которые будут описаны далее. Имитаторы АЭ устанавливаются на волновод через контактную среду. Такая форма и требования к волноводу позволяют исключить лишние трансформации и появление волн Лэмба, отличных от присущих объекту исследований. Приварка волноводов практически исключает потери сигнала при переходе из волновода в стенку объекта исследований, а применение болтового соединения через контактную среду минимизирует потери при передаче сигнала от имитатора к волноводу. Скос кромки под 45° является отражателем, который повышает коэффициент передачи волны от имитатора АЭ к волноводу.

При отсутствии априорной информации об опасных зонах на объекте контроля волноводы имитаторов АЭ привариваются на корпусе в соответствии с типом антенной решетки, чтобы имитировать максимальные трансформации АЭ. При наличии понимания об потенциально опасных или нагруженных местах на оборудовании волноводы имитаторов привариваются вблизи этих мест. Таким образом, возможна установка на объекте контроля имитаторов АЭ: отдельно или совместно; одного типа источника или

разного; сконцентрированного в опасных местах или разнесенного по площади всего объекта контроля. В настоящее время разработаны имитаторы АЭ следующих типов:

I) Имитатор дефекта типа «механическое развитие трещины» (рисунок 2.11), представляет собой устанавливаемый на волновод (2) образец основного материала или сварного соединения (3) в котором (любым способом) выращивается/изготавливается трещина определенной стартовой длины (L), развитие которой во время испытания провоцируется нагружающим устройством (4). Образец материала (3) может быть выполнен в виде рекомендованном для определения трещиностойкости – образцы типа D по [160] или типа 3 по [161], но удлиненного вида и на торце которых затем выполняется два отверстия и скос кромки. Такие образцы удобны тем, что для выращивания в них трещины могут быть использованы стандартные методики и испытательные машины на усталость, а сами образцы хорошо исследованы, поэтому требуемое усилие для страгивания трещины и др. характеристики напряженного-деформированного состояния дефекта поддаются расчету по известным зависимостям линейной механики разрушения. Таким образом, момент страгивания и скорость роста трещины могут быть строго определены, т.к. задаются длиной выращиваемой трещины (L) и силой, создаваемой нагружающим устройством (4). При этом нагружающее устройство может имитировать изменение реальной рабочей или испытательной нагрузки (график нагружения) действующей на оборудовании, или повторять график нагружения образцов при лабораторном исследовании материалов, или реализовывать произвольный график нагружения.

II) Имитатор дефекта типа «коррозионное развитие трещины», представляет собой имитатор I (рисунок 2.11), но с тем отличием, что он погружается в ванну с коррозионно-агрессивной средой (5), которая, например, подбирается из стандартного ряда специализированных методик испытаний [160 и др.] или рабочей средой, находящейся в оборудовании во время эксплуатации (продуктом). В образце (3) с помощью нагружающего устройства (4) создается напряжение с уровнем ниже начала страгивания и роста трещины длиной (L), определяемого также по зависимостям линейной механики разрушения. Таким образом, отличие данного имитатора от имитатора I является то, что рост трещины инициируется не усилием (нагрузкой), а капиллярными и коррозионными свойствами специальной агрессивной или рабочей среды (продукта).

III) Имитатор дефекта типа «равномерное коррозионное повреждение» или «растворение агрессивной средой» (рисунок 2.12), представляет собой устанавливаемый на волновод (2) образец основного материала или сварного соединения (3), который

погружается в ванну с коррозионно-агрессивной средой (5) подбираемой аналогично имитатору II. Ванна изготавливается из кислотостойких неметаллических материалов и поддерживается в горизонтальном положении с помощью неметаллического держателя (4).

IV) Имитатор дефекта типа «коррозионное растрескивание под напряжением», представляет собой имитатор III (рисунок 2.12) с тем отличием, что образец основного материала или сварного соединения (3) устанавливается под напряжением создаваемым механическим способом, например, с помощью изгибающих струбцин. Отличие от имитатора II заключается в том, что преимущественное повреждение образца представляет собой не одну центральную трещину, а сетку трещин, возникающую в основном по границам зерен металла образца (3) или зоне сплавления сварного соединения. Коррозионно-агрессивная среда в ванне (5) подбирается аналогично имитатору II.

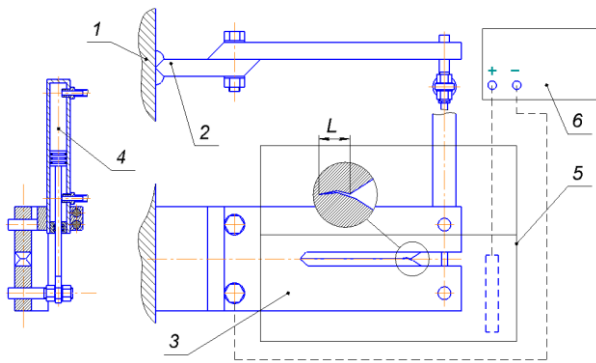


Рисунок 2.11 – Общая схема поясняющая принцип работы имитаторов типа: «механическое развитие трещины»; «коррозионное раскрытие трещины» и «водородное повреждение металла»

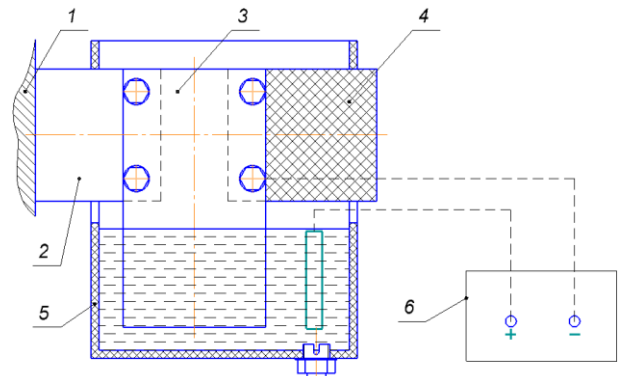


Рисунок 2.12 – Общая схема поясняющая принцип работы имитаторов типа: «равномерное коррозионное повреждение»; «растворение агрессивной средой»; «коррозионное растрескивание под напряжением» и «водородное повреждение металла»

V) Имитатор дефекта типа «водородное повреждение металла», представляет собой имитатор II (рисунок 2.11), III или IV (рисунок 2.12) с тем отличием, что в ванну (5) заливаются водородсодержащие электролиты и устанавливается гальваническая система (6), состоящая из источника питания постоянного тока, положительный полюс которого подключается к электроду погружаемому в ванну (5), а отрицательный соединяется с образцом (3). Скорость наводораживания образца (3) регулируется гальванической системой (6). Преимущественное повреждение образца (3) получаемое применением имитатора V является зарождение и рост расслоения металла (имитаторы III или IV и II

без заранее выращенной трещины), а также развитие трещин в присутствии водорода (имитатор II и IV при наличии одной или сетки трещин на образце). Для исключения записи паразитной АЭ, возникающей в процессе электролиза среды, процесс наводороживания образца может производиться периодами с фиксируемыми по времени остановками.

VI) Имитатор дефекта типа «протечка продукта через стенку» (рисунок 2.13а), представляет собой прижимной к волноводу (2) корпус (3) в который вкручивается жиклер (4) с калиброванным отверстием и штуцер шланга подачи испытательной среды под давлением (5). Имитатор моделирует собой дефекты типа сквозная трещина или свищ в широком диапазоне, что задается диаметром и глубиной отверстия в жиклере. Режим истечения продукта (среды) через жиклер связан с давлением в системе подачи среды, поэтому задается и отслеживается с помощью средств регулировки давления. При наличии технической возможности выполнить в стенке объекта контроля резьбовое отверстие имитатор данного типа встраивается в стенку объекта контроля, например, бобышку (6) – рисунок 2.13б. При этом позиции (4) и (5) используются те же, но со следующим отличием. Шланг подачи испытательной среды проводится во внутрь объекта контроля, что позволяет реализовать имитацию источника без нагружения самого оборудования, а значит исключается возможность его повреждения. После имитации резьбовое отверстие заглушается болтом с гайкой и прокладками по обе стороны или обваркой болта или др. способом, позволяющим обеспечить высокий уровень герметизации.

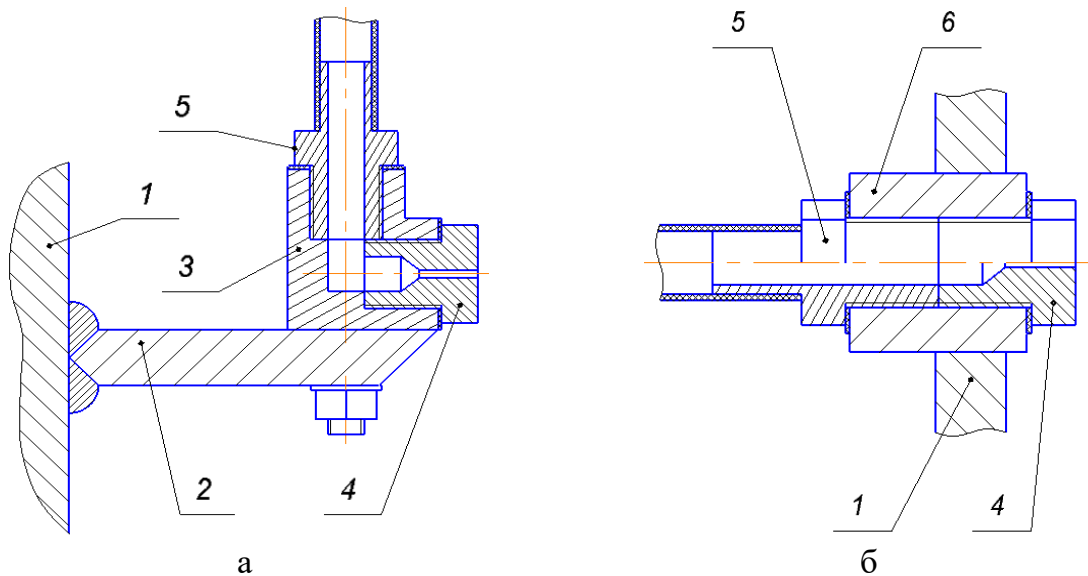


Рисунок 2.13 – Схема имитатора типа «протечка продукта через стенку» прижимного (а) и приварного (б) исполнения

VII) Имитатор дефекта типа «открывающийся свищ», фактически представляет собой прижимной или приварной имитатор VI и отличается тем, что на жиклер (4) устанавливается мембрана или заглушка из эластичного материала, которая обеспечивает герметичность до некоторого уровня давления. При достижении в системе подачи продукта (среды) давления заданного уровня мембрана (заглушка) прорывается с образованием течи. Давление срабатывания имитатора (вскрытия свища) задается толщиной мембраны (заглушки).

При этом нагружающее устройство (4) и дренажная система ванны (5) одинаковы у всех имитаторов, где они используются, являются переносными и имеют следующее исполнение. Нагружающее устройство (4) включает в себя: силовое устройство (в виде цилиндра одностороннего действия – при статическом нагружении образца или сервопривод – при усталостном нагружении образца); компрессор с ресивером для подачи газообразной среды или насос с гидроаккумулятором для жидкой среды (в зависимости от вида имитатора), раздаточный коллектор с запорными вентилями, датчики давления с выходом на ЭВМ, блок регулировки давления, предохранительный клапан и гибкие соединительные трубопроводы. Дренажная система ванны (5) состоит из штуцера, вентиля, сливного шланга и емкости сбора агрессивной среды.

Следующие два имитатора АЭ выполняются непосредственно на объектах контроля в сменных элементах разъёмных соединений.

VIII). Имитатор дефекта типа «негерметичность фланцевого соединения» (рисунок 2.14а), представляет собой искусственно выполненную несплошность в прокладке или месте соединения фланцевого соединения, через которую выходит испытательная среда, подаваемая нагружающим устройством под давлением или самотеком. Имитатором VIII может быть любое фланцевое соединение: крепления вентиля к штуцерам, крышек к штуцерам и люкам, а также фланцевое соединение на объекте контроля. Режим истечения рабочей среды задается диаметром несплошности и испытательным объектом контроля.

IX). Имитатор дефекта типа «негерметичный вентиль» (рисунок 2.14б), представляет собой искусственно выполненную несплошность в клапане вентиля (А) или сальнике его штока (Б), через которую выходит испытательная среда подаваемая нагружающим устройством под давлением или самотеком. Режим истечения рабочей среды также задается размером несплошности и испытательным давлением объекта контроля.

Таким образом, применяя указанные выше волноводы и имитаторы АЭ (I – IX) на действующем промышленном оборудовании без его разрушения возможно получить массив опорных данных максимально приближенных к реальным источникам АЭ. Однако, несмотря на все обозначенные положительные моменты, при апробации вышеуказанных имитаторов на реальном СО были выявлены следующие ограничения их применения:

а) большая часть статического оборудования относится к опасным производственным объектам, поэтому требует разработки, согласования и утверждения работ на них (особенно с применением сварки) с надзорными органами, а само выполнение работ возможно только в ближайший капитальный ремонт оборудования;

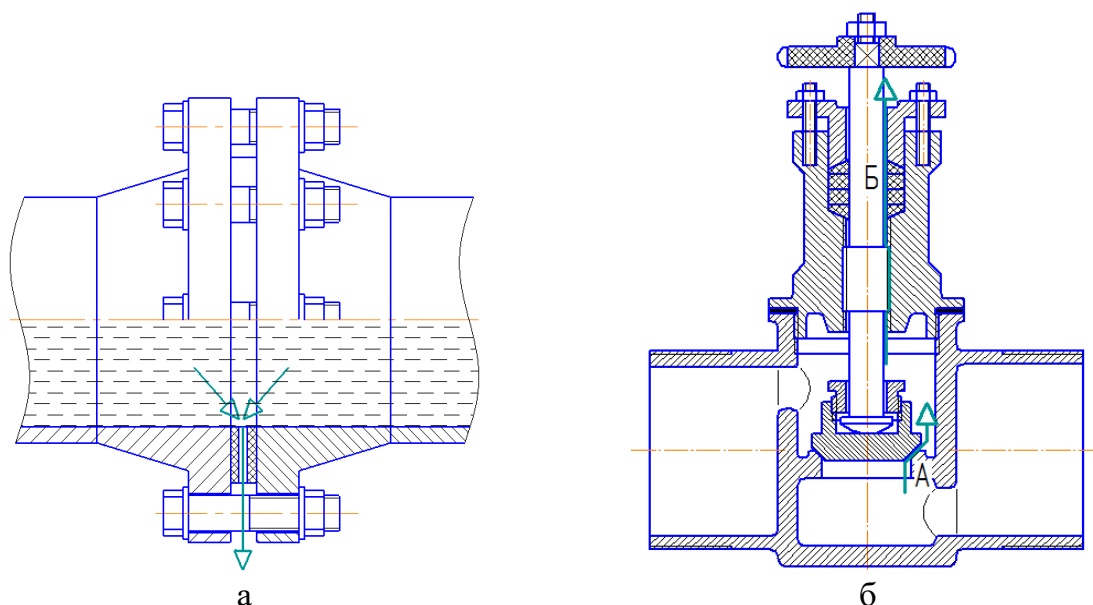


Рисунок 2.14 – Схема имитаторов типа «негерметичность фланцевого соединения» (а) и «негерметичный вентиль» (б)

б) доступ к большинству промышленному оборудованию (особенно в котором находятся взыво-, пожароопасные или высокотоксичные вещества) во время работы (эксплуатации) запрещен или требует разработки, согласования и утверждения работ на них с надзорными органами. При этом даже после согласования мероприятий по безопасному выполнению работ на работающем оборудовании они могут быть выполнены не раньше выполнения п. а), т.е. после ближайшего капитального ремонта;

в) как во время капитального ремонта, так и во время эксплуатации на оборудовании включенном в технологическую цепочку присутствуют сторонние неконтролируемые технологические шумы и помехи высокого уровня;

г) во время проведения работ на промышленном оборудовании устанавливаются жесткие ограничения на время исследований, при этом часто выполнение исследований не возможно, из-за стремления владельца сократить время простоев оборудования;

д) некоторое ответственное оборудование недоступно для проведения исследований (атомное оборудование, криогенное оборудование, изотермическое оборудование, теплоизолированные бетоном части печей, заглубленные в грунт сосуды и др.).

Поэтому в рамках данной работы был разработан оригинальный универсальный учебно-исследовательский стенд изучения генерации и распространения сигналов АЭ (сокращенно УУИС), описание которого приведено в п. 7.4 Главы 7. Данный стенд позволяет получать в лабораторных условиях такой же по объему и качеству массив опорных АЭ данных, как и на натуральных объектах, что снимает для большинства типового оборудования вопросы его доступности для получения опорных данных, необходимых для реализации предлагаемого метода.

Выводы по главе 2

1. Проанализированы недостатки амплитудных способов обнаружения АЭ сигналов и теоретически обоснована возможность использования критериев подобия кривых спектральной плотности мощности (СПМ) сигналов для обнаружения их источников. Теоретически установлено, что качественное и устойчивое детектирование сигналов ($P_{oc} > 50\%$) по порогу возможно начиная с уровня $a_{th} > a_n + 0,9$ дБ при наличии выбросов амплитуды в шуме не более $a_n = \sigma_1 - 7,5$ дБ при $a_s > \sigma_2 + 6$ дБ и $a_n = \sigma_1 - 11$ дБ при $a_s \approx \sigma_2$.
2. Впервые предложен метод иерархического анализа шумоподобных сигналов и сигналов на уровне шума промышленного оборудования, который основан на идентификации критических точек смены доминирующих механизмов повреждения путем анализа спектрального и временного подобия АЭ на трех временных масштабах: уровне отдельных сигналов; уровне рабочего цикла и уровне заданного времени наблюдения, превышающего в несколько раз первые два масштабных уровня. Показано, что предлагаемый подход повышает вероятность обнаружения дефектного состояния при любом ненулевом значении вероятности обнаружения дефекта на первом и втором уровне анализа АЭ.
3. Показано, что при использовании кривых СПМ для обнаружения АЭ источников помимо требований стандартов на АЭ контроль необходимо выполнение следующих условий: применение средств широкополосной записи и обработки АЭ; наличие

опорных (эталонных) кривых СПМ и допустимой величины отклонения от них (подобия им). При этом способы получения опорных данных при условии одновременного действия нескольких АЭ источников являются отдельно стоящей задачей, требующей проработки.

4. Впервые разработаны методы получения опорных данных, позволяющие установить АЭ от нескольких одновременно действующих источников на статическом и динамическом промышленном оборудовании. Особенность методов состоит в том, что они позволяют воспроизвести АЭ, максимально приближенную к действию реальных источников, в том числе, непосредственно на промышленных объектах, т.к. их применение не оказывает негативного влияния на объект контроля. Поэтому указанные методы можно использовать для оценки работоспособности и чувствительности алгоритмов анализа и обработки АЭ к источникам конкретного вида.

Глава 3. Выбор вариантов реализации метода иерархического анализа шумоподобной акустической эмиссии и сигналов на уровне шума на основе анализа алгоритмов и параметров оценки акустической эмиссии

3.1. Алгоритмы обнаружения сигналов акустической эмиссии

Обоснование выбора алгоритма обнаружения шумоподобных сигналов АЭ и сигналов на уровне шума приведено в п. 2.1 и 2.2 Главы 2. В данном же разделе пойдет речь о выборе в качестве параметра, необходимого для реализации предлагаемого метода спектрального алгоритма обнаружения сигналов АЭ, степень подобия сигналов заданным признакам (опорным данным). Однако, как обозначено в п. 2.3 Главы 2, оценка подобия сигналов АЭ может быть реализована, как на основе сравнения кривых спектральной плотности мощности (СПМ), так и на основе сравнения параметров оценки АЭ характеризующих изменение СПМ в амплитудной и частотной областях. Поэтому далее приводится обоснование выбора алгоритмов сравнения в виде алгоритмов кластеризации и классификации АЭ, а также параметров оценки АЭ с последующим исследованием эффективности вариантов их применения.

При практической апробации предлагаемого метода в качестве метода сравнения используется алгоритм амплитудной пороговой дискриминации, поскольку на сегодня при АЭ контроле он применяется в качестве основного.

3.2. Алгоритмы частотно-временного преобразования акустической эмиссии

Результатом применения частотно-временного преобразования (ЧВП) к кадру записи АЭ является получение периодограммы или спектрограммы, которые традиционно в методе АЭ получали посредством преобразования Фурье. Однако в настоящее время разработано множество видов и подвидов частотно-временных преобразований (ЧВП) другого типа [162-167 и др.]. Для решения практических задач, связанных с оценкой динамики изменения спектральных характеристик АЭ известно применение пяти основных видов ЧВП: STFT – оконное преобразование Фурье (J.V.J. Fourier), WT – вейвлет-преобразование (от wavelet – маленькая волна), SPWD – псевдопреобразование Вигнера-Вилля (E.P. Wigner – J.-A. Ville), ChWD – преобразование Чои-Вильямса (H. Choi – W.J. Williams) и ННТ – псевдопреобразование Гильберта-Хуанга (D. Hilbert – N.E. Huang) [A12]. Указанные ЧВП в методе АЭ применяются для: расчета энергии (мощности) АЭ; определение времени прихода дисперсионных составляющих (мод) сигналов АЭ; локации АЭ источников; распознания (идентификации) физических процессов, инициирующих АЭ и их

исследование; частотной фильтрации сигналов АЭ; обнаружения фрактальности (масштабных уровней самоподобия) в АЭ сигналах или исследования структуры АЭ сигналов; оценки передаточных характеристик акустического тракта; акустического течеискания; выявление отклонений в режиме работы машин и механизмов и др.

Обозначенные ЧВП хорошо известны (см. п. 4.3.5 Главы 4), поэтому здесь только обозначим их принцип. Общей сутью ЧВП является разделение сигнала на малые временные отрезки с последующим их разложением по базисным функциям, которые у каждого ЧВП «свои»: при STFT используются бесконечные гармонические функции; при WT – короткие волновые функции разного вида (вейвлеты); при SPWD и ChWD – автокорреляционная функция анализируемого сигнала, получаемая сверткой его фрагментов на рассматриваемом временном отрезке; при ННТ – эмпирические модовые декомпозиции анализируемого сигнала, являющиеся средним между огибающими его максимумов и минимумов на разном масштабном уровне. Однако даже из такого краткого описания видно, что разрешение SPWD, ChWD и ННТ зависит от свойств самого анализируемого сигнала, а STFT и WT от уровня согласованности свойств сигнала с нормированной базисной функцией.

Несомненно, каждый вид ЧВП имеет сильные и слабые стороны, но, прежде всего, они отличаются друг от друга помехоустойчивостью и частотно-временным разрешением, что экспериментально определяется путем их сравнения на модельных сигналах или контрольных выборках. Однако работ по их комплексному сравнению на одних и тех же выборках близких к дискретной и непрерывной АЭ на момент выполнения работы установленного не было. Поэтому требуется сравнение основных видов ЧВП на модельных сигналах специального вида, которые применяются для исследования эффективности различных алгоритмов обработки в теории сигналов и методе АЭ [6, 150, 168, 169]. Описание модельных сигналов и способов их получения приведено в п. 4.1.1. Главы 4. Результаты экспериментальных исследований и выбор ЧВП для реализации в предлагаемом методе проведены в п. 5.1 Главы 5.

3.3. Алгоритмы фильтрации и шумоподавления акустической эмиссии

Как было сказано в п. 1.3. Главы 1, возникновение шумоподобной АЭ связано с наложением сигналов от нескольких одновременных действующих источников. В п. 2.2 Главы 2 показано, что в условиях промышленного контроля итоговый регистрируемый сигнал подчиняется закону аддитивности, но необходимо учитывать изменение шума. Учитывая все вышесказанное выражение (2.10) переписывается как:

$$a(t) = x_1(t) + \gamma \cdot x_n(t), \quad (3.1)$$

где: $a(t)$ – итоговый шумоподобный сигнал $a(t)$; $x_1(t)$ – сигнала от исследуемого источника; $x_n(t)$ – сигнал от окружающего фона или стороннего (не исследуемого) источника и γ – текущий масштабный уровень $x_n(t)$.

Процедуры обработки АЭ данных, направленные на выделение и подавление в сигнале $a(t)$ составляющих $x_n(t)$ называется фильтрацией. Сложность обработки АЭ данных, в отличие, например, от активных акустических методов, состоит в том, что параметры искомого АЭ сигнала и время его появления заранее не известны. Сигнал АЭ формируются каждый раз независимо от оператора и характеристик аппаратуры и определяется: свойствами материала, видом АЭ источника, геометрией объекта контроля и условиями его нагружения. При этом процедура фильтрации часто тесно взаимосвязана или входит в процедуры: обнаружения (детектирования) сигналов АЭ, оценки их параметров или алгоритмы разделения источников АЭ на классы.

Классическими и основными на сегодня методами фильтрации АЭ данных являются: амплитудная дискриминация (см. п. 1.4.4 Главы 1), полосовая частотная фильтрация высоких и низких частот, а также временная, параметрическая и пространственная селекция. Данные фильтры хорошо известны [18, 27 и др.], поэтому их пояснение здесь не приводится. Однако следует отметить успехи в применения в методе АЭ так называемых логических фильтров, к которым относятся: контрольные временные параметры, амплитудный фактор, геометрический фактор, критерий расхождения амплитуд и RA-фильтр.

Контрольные временные параметры в разных АЭ системах называются по-разному, но они имеют общий смысл контроля соответствия либо формы регистрируемых сигналов заданным условиям, либо условиям формирования ими локационных событий. К первым относятся: Интервал Контроля Длительности сигнала (ИКД или Single Channel Event Time Out (SCETO) или Hit Definition Time (HDT)); Интервал Контроля Конца сигнала (ИКК или Dead Time или Hit Lockout Time (HLT)); Интервал Контроля Пика (амплитуды) сигнала (ИКП или Rise Time to Out (RTTO) или Peak Definition Time (PDT)). Ко вторым: Интервал Формирования События (ИФС или максимальное время распространения сигнала от источника до преобразователя) и Допуск на Максимальный Пробег (ДМП или допустимое время задержки прихода сигнала на разные преобразователи над расчетным, полученным делением известного расстояния между преобразователями на скорость распространения волны в материале). Применение ИКК, ИКП, ИКД, ИФС и ДМП направлено на регистрацию/отображение

только тех сигналов АЭ, параметры регистрации которых удовлетворяет заданным условиям к форме сигналов и времени их регистрации.

Амплитудный фактор, геометрический фактор, критерий расхождения амплитуд и RA-фильтр – это дополнительные ограничения формирования локационных событий по отношению к контрольным временным параметрам. Первый представляет условие допустимости превышения амплитуды сигнала, пришедшего ранее, над сигналом, пришедшим позднее него, внутри каждого ИФС. Второй – условие допустимости отклонения от порядка срабатывания преобразователей в антенных группах, исходя из их формы и расположения на объекте контроля. Третий – условие расхождения амплитуд сигналов, формирующих локационное событие, с расчетными значениями, полученными произведением известного коэффициента затухания на расстояние между соответствующим преобразователем и вычисленным местоположением источника. Четвертый – условие предельного искажения сигнала при его трансформации во время распространения в объекте контроля, представляет собой произведение RA (или отношение – R/A) времени нарастания сигнала (Rise time) и его амплитуды (Amplitude).

Даже из такого краткого описания классических приемов фильтрации АЭ данных видно, что они не пригодны для реализации при беспороговых алгоритмах записи и обработки шумоподобной АЭ, т.к. используют параметры, характеризующие импульсную АЭ, т.е. отсчитываемые по пересечению амплитудного порога дискриминации. Поэтому для фильтрации шумоподобной АЭ необходимо применение других алгоритмов. При этом, чтобы не утратить положительный эффект от беспороговой широкополосной записи АЭ при фильтрации также должны использоваться широкополосные алгоритмы, исключаяющие потерю диагностических данных. К таким алгоритмам относятся алгоритмы адаптивной фильтрации, и, поскольку в п. 2.2 Главы 2 и п. 5.1 Главы 5 для апробации предлагаемого метода анализа шумоподобной АЭ выбраны спектральные методы на основе преобразования Фурье, то далее рассматриваются вариации на его основе. Суть адаптивной фильтрации заключается в приложении к сигналу воздействия, передаточная функция которого контролируется и меняется по оптимизационному алгоритму адекватно виду действующей помехи во время ее появления. Из-за математической сложности алгоритмов адаптивной фильтрации они являются цифровыми, что в нашем случае оптимально, т.к. их можно совместить с процедурой частотно-временного преобразования АЭ.

Суть основополагающей схемы адаптивной фильтрации заключается в раздельной, но синхронной регистрации окружающего фона, шума или сигнала от не исследуемого источника $x_n(t)$ и диагностического комплексного сигнала $a(t)$ с последующим вычитанием спектральных составляющих $x_n(t)$ из $a(t)$ на каждом временном участке [145, 146 и др.].

Однако в реальной практике АЭ контроля возникают ситуации, когда невозможно или нецелесообразно регистрировать $x_n(t)$ по причинам: неопределенности места локализации источника на большом объекте контроля; существенной анизотропии искажения (трансформации) сигнала при его распространении в объекте контроля в разных направлениях, а также малости объекта контроля, когда места регистрации $x_n(t)$ и $a(t)$ невозможно разнести. В этом случае применяется «слепая адаптивная фильтрация», заключающаяся в подавлении в $a(t)$ составляющих неизвестной функции $x_n(t)$, характеристики которой предполагаются (прогнозируются) на основе моделей $x_l(t)$ или $x_n(t)$ с применением различных алгоритмов (фильтрация Винера, скрытые Марковские модели, метод наименьших квадратов и др.) [6, 126].

Результатом выполнения подготовительных процедур любой из схем адаптивной фильтрации является получение спектрального образа опорного сигнала $x_n(t)$, который является взвешенной оценкой помехи. Далее возможны два варианта спектрального подавления составляющих $x_n(t)$ в $a(t)$ – это спектральное вычитание и спектральная коррекция, которые в общем виде можно записать как [A1, A11, A13]:

$$S_x(f)_i = S_y(f)_i - S_n(f)_i, \quad (3.2)$$

$$S_x(f)_i = S_y(f)_i \cdot K_n(f)_i, \quad (3.3)$$

В формулах (3.2) и (3.3): $S_y(f)_i$ и $S_x(f)_i$ – спектр сигнала $a(t)$ соответственно до и после фильтрации, $S_n(f)_i$ – спектр сигнала $x_n(t)$, $K_n(f)$ – функция частотной коррекции фильтра, представляющая собой обратную функцию спектральному образу сигнала $x_n(t)$, i – номер спектральной составляющей по частоте f .

Алгоритмы спектрального вычитания (3.2) больше распространены в системах обработки и анализа речевых сигналов [147], а алгоритмы частотной коррекции (3.3) – в вибродиагностике (ГОСТ ИСО 8041-2006, ISO 6487:2015 и др.). Однако и те, и другие методы возможно использовать в методе акустической эмиссии [A1, A11, A13]. При этом в работе [147] показано, что когда речевые сигналы имеют вид близкий к гармоническому, то результаты спектрального вычитания имеют самые высокие показатели по качеству и разборчивости речевых сигналов.

Также одним из современных и перспективных способов фильтрации широкополосных АЭ данных, является кластерная или классификационная параметрическая фильтрация [170, 171]. Её идея состоит в разделении АЭ данных на группы (кластеры) с последующим удалением из обработки (анализа) либо кластеров шума или не исследуемых в настоящее время АЭ источников (концепция «разделяй и властвуй»), либо удаляются только некоторые составляющие сигнала, присущие только определенным кластерам. Оба подхода являются перспективными и совместимыми со способами обработки АЭ данных использующих алгоритмы кластеризации (классификации) данных.

На основании вышеизложенного для оценки возможности реализации в предлагаемом методе выбраны спектральные алгоритмы фильтрации (вычитания и частотной коррекции) и кластерная фильтрация. Оценка возможности и эффективности применения вариантов фильтрации обозначенных алгоритмов требует специальных исследований, которые проведены и описаны в п.5.2 Главы 5.

3.4. Параметры оценки акустической эмиссии

Традиционно АЭ оценивают с применением так называемых «пороговых» параметров (получаемых с помощью амплитудного порога дискриминации – рисунок 3.1), которые разделяются на параметры оценки импульсной АЭ и непрерывной АЭ или потока АЭ [6, 172 и др.].

Импульсную АЭ оцениваются с помощью параметров, описывающих особенность формы сигналов и параметров, характеризующих их энергетическое содержание. К первым относятся: амплитуда (или максимальное значение - a_s), длительность (D_s), время нарастания (или длительность переднего фронта - t_R или в отсчетах – счет до пика), время спада (или длительность заднего фронта - t_d). Ко вторым относят: среднюю мощность (W_s) и энергию сигнала (E_s), и их квазиэнергетические аналоги, введенные в различных АЭ системах в связи с технической сложностью точного расчёта энергии сигнала по его форме – это параметр MARSE и др. [6, 29]. Также известно применение некоторых комбинаций выше озвученных параметров для оценки формы импульса, в основном, это: RA – параметр (произведение $t_R \cdot a_s$), A/R – параметр (отношение a_s/t_R) и A/D – параметр (отношение a_s/D_s).

Из п. 2.1 Главы 2 следует, что при близких a_s и a_n ($SNR < 6$ дБ) при минимально возможном уровне порога $a_{th} = a_n - 9,5$ дБ вероятность обнаружения сигнала на уровне шума в амплитудно-временной области $P_{oc} \leq 50\%$, а при $a_{th} = a_n - 20$ дБ, в свою очередь,

становится не определенным ($P_{oc} \leq 10\%$) параметр a_s при любом его значении. Следовательно, параметр a_s можно признать пригодным для анализа шумоподобной АЭ, но в ограниченном диапазоне. При этом использование параметров E_s и производную от нее по времени W_s более предпочтительно, чем a_s , т.к. они пропорциональны квадрату изменения a_s , что делает малые изменения в сигнале более заметными. Поэтому из этой группы параметров для оценки шумоподобной АЭ в работе выбраны в качестве основных параметры a_s и E_s , или в зависимости от используемой АЭ аппаратуры различные её квазиэнергетические аналоги (E'_s , $MARSE$, $Signal Strength$ и др. [6, 29, 173])

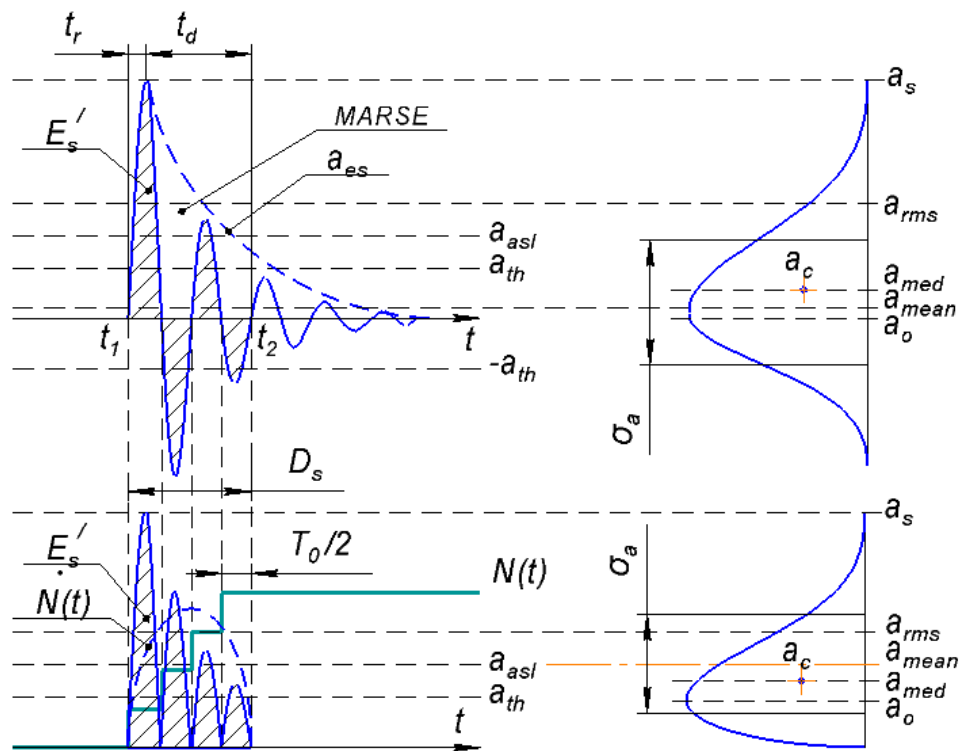


Рисунок 3.1 – Параметры оценки АЭ в амплитудной области

В условиях поккадровой записи шумоподобной АЭ параметр D_s становится неработоспособным, т.к. принимается равным длине кадра записи АЭ (т.е. $t_{rec} = n_t / f_d$, где: n_t – количество отсчетов в кадре, а f_d – частота дискретизации), а поскольку параметры t_r , t_d , RA , A/R и A/D отсчитываются от тех же временных меток, то они также теряют заложенный в них смысл и не могут быть применены для анализа кадров записи шумоподобной АЭ.

Поток АЭ и непрерывную АЭ в пороговом режиме регистрации оценивают: суммарным счетом выбросов (N) и его первой производной по времени - скоростью счета (\dot{N}) или суммарным числом импульсов (N_Σ) и его первой производной по времени - активностью (\dot{N}_Σ). Однако для анализа шумоподобной АЭ данные параметры практически не применимы. Так, при использовании порога дискриминации количество

пересечений порога N и, следовательно, \dot{N} будет пропорционально основной (центральной) частоте ($f_0 = 1/T_0$) в сигнале, что подробно исследовано в работе [6]. При беспороговом режиме записи АЭ параметры N и \dot{N} получить в принципе невозможно. Параметры из другой группы (N_Σ и \dot{N}_Σ) при покадровой записи АЭ становятся пропорциональны числу и скорости регистрации АЭ кадров, т.е. скорости обработки или емкости обработки АЭ аппаратуры по [29]. Таким образом, в беспороговом режиме записи АЭ без применения процедур установления принадлежности кадров записи конкретному типу акустического источника параметры N , \dot{N} , N_Σ и \dot{N}_Σ не позволяют отслеживать характер изменения АЭ от него, т.е. неработоспособны. По этой же причине не будут работоспособны и образованные от них параметры, например, эффективное значение АЭ (произведение \dot{N} или \dot{N}_Σ на среднее значение амплитуды АЭ за тот же расчетный период) [174].

Традиционно в беспороговом режиме регистрации непрерывной (поточковой) АЭ оценка характера ее изменения проводится с использованием следующих параметров [6, 16]: среднее значение (a_{mean}), среднеквадратичное значение (a_{rms} или RMS – root mean square), средний уровень (a_{asl} или ASL – Average Signal Level) и огибающая АЭ (a_{es}). Указанные параметры рассчитываются с применением плавающего окна, величина которого влияет на возможность обнаружения сигналов АЭ на фоне шума. Однако при всех равных условиях большей чувствительностью к амплитудным выбросам сигнала на фоне сопоставимого шума обладают параметры a_{rms} и a_{es} . Первый – из-за наличия квадратичной связи с величиной a_s , а второй – за счет применения закона снижения уровня a_{es} после выброса a_s , что позволяет усилить отличие сигнала от шума в большей мере, чем колебание общего тренда, получаемого с помощью параметров a_{asl} и a_{mean} . Поэтому из этой группы для оценки шумоподобной АЭ в работе выбраны в качестве основных параметры a_{rms} и a_{es} .

Хотя и в меньшей степени, чем a_s , a_{mean} и a_{rms} , в амплитудной области оценки АЭ применяют и другие стандартные статистические параметры такие как: мода (a_0), медиана (a_{med}), центр тяжести (a_c), дисперсия (σ_a^2), среднеквадратическое отклонение (или СКО = σ_a), эксцесс или kurtosis (γ_a), асимметрия или skewness (s_a) и информационная энтропия (H_a) [175-177 и др.]. Данные параметры универсальны и подходят для описания отличий между сигналами или сигналами и шумом по особенностям, как их амплитудных, так и частотных распределений (рисунок 3.2). Здесь следует отметить, что в координатах частотных распределений моду называют центральной, основной частотой или частотой пика (f_{Gm}), медиану – медианной частотой

(f_{med}), среднеквадратическое значение – среднеквадратичной частотой (f_{rms}) и центр тяжести – частотный центроид (f_c) [121, 178-181]. В общем случае средняя частота (f_{mean}) равна половине анализируемого диапазона частот, поэтому она не имеет особого смысла и её применяют только при заданном условии выделения эффективной полосы частотного распределения. В частотной области тоже возможно оценить особенности распределения энергий с получением дополнительных параметров в виде: G_0 , G_{mean} , G_{rms} , G_{med} , G_m , G_c , σ_G^2 , γ_G , s_G , H_G , которые аналогично характеризуют моду, среднее, среднеквадратическое значение, медиану, максимальное значение спектра, центр тяжести, дисперсию, эксцесс, асимметрию и энтропию, но уже не по частотам, а по величинам энергии (мощности). Также известно, что, как интегрально, так и по полосам частот, E_s и W_s проще всего рассчитывать в частотной области, как площадь под кривой частотного распределения, поэтому обозначим E_s и W_s , определенные в частотной области, как E_f и W_f .

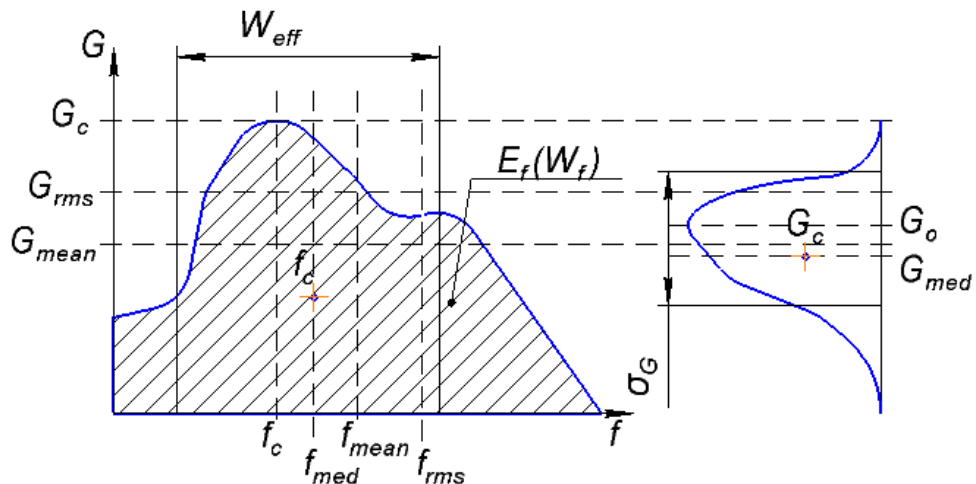


Рисунок 3.2 – Параметры оценки АЭ в частотной области

Таким образом, многопараметрический образ сигнала и шума, состоящий из 26 параметров, описывающих их амплитудное и частотное представление (a_s , a_0 , a_c , a_{asl} , a_{rms} , a_{med} , σ_a^2 , γ_a , s_a , H_a , E_s (E_f), f_{Gm} , f_{med} , f_{mean} , f_c , f_{rms} , G_m , G_0 , G_{mean} , G_{rms} , G_c , G_{med} , σ_G^2 , γ_G , s_G , H_G), позволяет с высокой долей уверенности предполагать возможность выделения отличительных особенностей сигнала, сопоставимого с уровнем шума. Однако в связи с тем, что оценка параметров a_0 , G_0 , a_c , G_c , a_{med} и G_{med} требует построение соответствующих распределений, что подразумевает объем вычислений, несопоставимый по затратам с их информативностью, то данные параметры переведены в разряд вспомогательных. Поскольку работа строится на сопоставлении эффективности оценки шумоподобной АЭ в амплитудной и частотной области, то остальные параметры

принимается в качестве основных (кроме a_{ast} , который также принят вспомогательным, о чем говорилось выше).

В различных литературных источниках на основе стандартных параметров предложены, различные специальные параметры. Целью их применения является усиление конкретных (заранее известных) отличий между сигналом и шумом, например, наличия отдельных выбросов в непрерывном сигнале или искажения формы сигнала или перекоса в перераспределении энергии и т.д. Специальными параметрами, применяющимися в методе АЭ являются [175-178, 181 и др.]: пик-фактор (crest factor – отношение a_s/a_{rms}); коэффициент импульсности (impulse factor – отношение a_s/a_{mean}); коэффициент формы (shape factor – отношение a_{rms}/a_{mean}); коэффициент отклонения (clearance factor – отношение a_s/E_s); коэффициент прироста (margin factor – отношение $a_s / [\sum |a(t)|^{0.5} / n_t]^2$); энергетический коэффициент (energy index – отношение $a_{rms} i / \sum a_{rms} i$); коэффициент эксцесса (kurtosis factor – отношение γ/a_{rms}^4); коэффициент асимметрии (skewness factor – отношение s/a_{rms}^3), эффективная ширина спектра (отношение E_s или W_s к максимальному значению частотного распределения G_c) или энергия/мощность в выбранной полосе частот (E_{df} или W_{df}). Поскольку данные параметры могут быть рассчитаны по выбранным выше основным стандартным параметрам оценки шумоподобной АЭ, то они принимаются в качестве вспомогательных, т.к. могут быть использованы в случае необходимости выделения каких-то конкретных отличий между сигналами или сигналами и шумом, которые устанавливаются в каждом случае практического направления применения метода АЭ. Исключением здесь является параметр эффективной ширины спектра (W_{eff}), который принят в качестве основного, т.к. позволяет описать сигнал, как процесс с равномерным спектром шириной E_s и высотой G_m . Параметр W_{eff} принимается вместо G_m и f_{Gm} , которые в шумоподобных сигналах связаны с шумом, обладающим высокой энергетической долей в кадре АЭ записи, в то время, как параметр W_{eff} косвенно отражает и количество энергии, сосредоточенной вне G_m . Поэтому в нашем случае параметры G_m и f_{Gm} переводятся в разряд вспомогательных.

На основании всего вышесказанного для использования в беспороговом иерархическом методе анализа АЭ, а также возможности сравнения результатов его апробации относительно традиционной методики анализа АЭ с применением амплитудного порога дискриминации, выбраны основные и вспомогательные параметры оценки АЭ, которые сведены в таблицы 3.1 – 3.4, где: $a(t)$ – кадр записи АЭ, длиной l -отсчетов ($t=0, 1, 2 \dots l-1$), $G(f)$ – спектральная плотность мощности (СПМ) АЭ

в кадре записи $a(t)$, f – частота входящая в диапазон анализа АЭ ($f \in \Delta f$), n_f – количество частотных составляющих, τ – постоянная времени. Основные параметры планируются для применения при описании диагностических событий D_1 и D_2 . Вспомогательные параметры, либо необходимы для расчета основных параметров, либо планируются для применения в случае необходимости выделения каких-то конкретно установленных отличий между сигналами или сигналами и шумом, которые устанавливаются в каждом конкретном практическом направлении применения метода АЭ.

Таблица 3.1

Основные параметры оценки АЭ в амплитудной области:		
- амплитуда сигнала	$a_s = \max a(t) $	(3.4)
- огибающая сигнала	$a_{es} = \begin{cases} a(t) , & \text{при } a(t) \geq a_{es(i-1)} \\ a_{es(i-1)} \cdot \exp(-1/\tau) \end{cases}$	(3.5)
- среднееквадратичное значение сигнала	$a_{rms} = [\sum a(t)^2 / l]^{0,5}$	(3.6)
- энергия сигнала	$E'_s = \sum a(t)^2$	(3.7)
или		
- MARSE	$MARSE = \sum a_{es}$	(3.8)
- энтропия сигнала	$H_a = -\sum a(t) \cdot \log_2(a(t))$	(3.9)
- дисперсия сигнала	$\sigma_a^2 = [\sum (a(t) - a_{mean})^2 / (l-1)]^{0,5}$	(3.10)
- эксцесс (kurtosis) сигнала	$\gamma_a = \{\sum [(a(t) - a_{mean}) / \sigma_a^2]^4\} - 3$	(3.11)
- асимметрия (skewness) сигнала	$s_a = \sum [(a(t) - a_{mean}) / \sigma_a^2]^3$	(3.12)

Таблица 3.2

Основные параметры оценки АЭ в частотной области:		
- мощность сигнала	$W_f = \sum G(f)$	(3.13)
- эффективная ширина спектра	$W_{eff} = W_f / G_m$	(3.14)
- среднее значение спектра	$G_{mean} = \sum G(f) / n_f$	(3.15)
- среднееквадратичное значение спектра	$G_{rms} = [\sum G(f)^2 / n_f]^{0,5}$	(3.16)
- энтропия	$H_G = -\sum [f \cdot G(f) \cdot \log_2(f \cdot G(f))]$	(3.17)
- дисперсия спектра	$\sigma_G^2 = [\sum (G(f) - G_{mean})^2 / (f-1)]^{0,5}$	(3.18)
- эксцесс (kurtosis) спектра	$\gamma_G = \{\sum [(G(f) - G_{mean}) / \sigma_G^2]^4\} - 3$	(3.19)
- асимметрия (skewness) спектра	$s_G = \sum [G(f) - G_{mean}] / \sigma_G^2]^3$	(3.20)
- медианная частота	f_{med} при $G_{med} = 1/2 \cdot \sum G(f)$	(3.21)
- частотный центроид	$f_c = [\sum (f \cdot G(f)) / \sum G(f)]$	(3.22)
- среднееквадратичная частота	$f_{rms} = ([\sum (f^2 \cdot G(f)) / \sum G(f)]^{0,5}$	(3.23)

Таблица 3.3

Вспомогательные параметры оценки АЭ в амплитудной области:		
- средняя амплитуда сигнала	$a_{mean} = \sum a(t) / l$	(3.24)
- средний уровень сигнала	$a_{asl} = \sum a(t) / l$	(3.25)
- пик-фактор	$k_{crf} = a_s / a_{rms}$	(3.26)

Вспомогательные параметры оценки АЭ в амплитудной области:		
- коэффициент импульсности	$k_{if} = a_s / a_{mean}$	(3.27)
- коэффициент формы	$k_{sf} = a_{rms} / a_{mean}$	(3.28)
- коэффициент отклонения	$k_{clf} = a_s / E$	(3.29)
- коэффициент прироста	$k_{mf} = a_s / [\sum a(t) ^{0.5} / l]^2$	(3.30)
- энергетический коэффициент	$k_{ei} = a_{rms} / \sum a_{rms}$	(3.31)
- коэффициент эксцесса	$k_\gamma = \gamma_a / (a_{rms})^4$	(3.32)
- коэффициент асимметрии	$k_s = s_a / (a_{rms})^3$	(3.33)

Таблица 3.4

Вспомогательные параметры оценки АЭ в частотной области:		
- максимум спектра	$G_m = \max G(f)$	(3.34)
- частота при пике	f_{G_m} при G_m	(3.35)

3.5. Алгоритмы локации источников акустической эмиссии

Алгоритмы определения координат источников АЭ относятся к пассивным алгоритмам звуковой локации, которые в настоящее время можно разделить: по точности установления координаты источника (зонная, линейная, плоскостная и объемная) [6]; по алгоритму расчета пути между ПАЭ (линейная, цилиндрическая, конусная, эллиптическая и сферическая) [6]; по минимальному количеству ПАЭ в антенной группе (линейная с двумя ПАЭ, плоскостная треугольная, плоскостная четырехугольная и произвольная) [6] и по параметру, который используется для расчета координат источника: коэффициент затухания во временной [182] или частотной областях [183], смещение частоты [184], фазовая задержка [185], дисперсионная задержка [186] или разность времен прихода (РВП) сигнала на различные ПАЭ. В свою очередь РВП может быть рассчитана: во временной области (как разница между временем срабатывания порогового детектора по каналам регистрации АЭ) [3, 6]), в частотной области (как разница между максимумами спектрограмм или по взаимному спектру сигналов [187]) и по корреляционной зависимости [33-35].

В принципе, любой из известных методов локации может быть использован для локализации мест шумоподобных источников АЭ. Ограничением здесь является только способ обнаружения сигналов АЭ. Из-за обозначенных в п. 1.4.4 Главы 1 недостатков амплитудного порогового детектора, он не может быть использован для локации источников шумоподобной АЭ, т.к. в результате дает высокую погрешность и большое количество ложных локационных событий (что также будет показано в Главе 6). Фазовый способ обнаружения сигналов также работоспособен только при дискретной АЭ и небольшом удалении источника от ПАЭ [185]. Корреляционный способ позволяет

лоцировать шумоподобные источники, но требует дуплетного применения ПАЭ в каждой точке записи АЭ [34]. Дисперсионный способ не пригоден для локации по шумоподобной АЭ, т.к. дисперсионные составляющие имеют энергию близкую к шуму и не различимы на его фоне, ни в амплитудной, ни в частотной областях. Таким образом, способы локации шумоподобных источников сводятся к необходимости применения спектральных алгоритмов. Однако, поскольку в предлагаемом методе используется способ обнаружения источников АЭ по подобию их форм СПМ, то на основании его результатов имеется принципиальная возможность сразу проводить локацию по каждому типу источника АЭ. В связи с этим, было решено модернизировать известный и хорошо проработанный триангуляционный метод локации. Описание внесенных в него изменений приведено в п. 4.3.3 Главы 4 и работах [А14, А37].

3.6. Алгоритмы разделения источников акустической эмиссии на классы

Основными методами разделения АЭ данных на классы или группы, обладающими каким-то общим свойством или признаком, являются методы классификации и кластеризации. Под классификацией данных понимается управляемая процедура разделения множества данных на подмножества (классы, группы, состояния) с использованием априори известном количестве подмножеств и/или их информационных признаков (параметров). Под кластеризацией данных понимается неуправляемая процедура разделения множества данных на подмножества по принципу поиска в них схожести при заданной статистической мере близости. При этом часто граница между классификацией и кластеризацией данных весьма условна и практически не различима. Однако их общей целью является выделить из общей выборки подмножества так, чтобы внутри одного подмножества объекты сравнения были максимально похожи и максимально отличны от других подмножеств. Между тем количество видов и подвидов алгоритмов классификации и кластеризации данных весьма велико [157, 188 и др.]. Поэтому в данном разделе они приводятся совместно и только те из них, которые нашли применение в методе АЭ.

Основным принципом классификации АЭ данных, используемым сегодня, является разделение источников на IV типа по степени их опасности для эксплуатации объекта контроля на: пассивный, активный, критически активный и катастрофически активный [4, 6, 10]. В основу классификации положена связь характеристик АЭ с критериями прочности материала. Как уже отмечалось ранее (п. 1.1 Глава 1), первым из предложенных критериев является степенной показатель Х.Л. Данегана [1, 6], который в

дальнейшем был адаптирован для НК промышленного оборудования Ивановым В.И. и Быковым С.П. [6] и вошедший в нормативные документы, как локально-динамический критерий [10]. Наравне с ним, сегодня нормативными документами регламентировано применение параметрических классификаций в следующих АЭ координатах [10]: «амплитуда источника АЭ» (амплитудный критерий); «активность – сила источника АЭ» (интегральный критерий); «локализация энергии – приращение энергии источника АЭ» (интегрально-динамический критерий); «сила – приращение силы источника АЭ» (критерий MONPAC [6, 10, 173]). Кроме этого, доведено до практического применения несколько новых параметрических классификаций в следующих АЭ координатах: «амплитуда – частота – параметр формы» [189]; «активность – средняя амплитуда локализованных источников АЭ» [190]; «коэффициент Кайзера – коэффициент накопления АЭ» [191]; «амплитуда – энтропия распределения амплитуд АЭ» [192]. Также известен многоуровневый критериальный подход разбраковки локационных событий по кадрами записи АЭ, включающий оценку: «параметров формы сигнала события (амплитуду, время нарастания амплитуда и характер ее спада до 1/3 и 1/5 амплитуды); число локационных событий в ограниченной области; корреляционные связи между сигналами в событии; влияние параметра нагружения на АЭ события и частотное распределение мощности в них» [193].

Как видно, из перечисленных «классических» пороговых параметров классификации основные критерии связаны с выделяемой энергией (мощностью) источником АЭ и/или скоростью (частотой) ее выделения. В шумоподобной АЭ регистрируемые сигналы не имеют явно выраженной формы, поэтому имеют минимальное энергетическое соотношение (отличие) сигнал/шум при неограниченной длительности. А скорость изменения АЭ совпадает со скоростью изменения основного (доминирующего) источника. Поэтому для разделения шумоподобной АЭ, регистрируемой в беспороговом режиме, обозначенные способы классификации не подходят и нужны другие подходы. Единственные известные способы классификации шумоподобных сигналов, пригодные для беспорогового режима регистрации АЭ, разработаны в трибодиагностике и представляют собой интегральные параметрические методы. Первый заключается в разделении АЭ данных в координатах: «скорость изменения активности АЭ – скорость изменения дисперсии АЭ» [194]. Второй основан на отслеживании степени изменения среднеквадратичного значения (мощности) сигнала АЭ (RMS) [195].

Однако анализ публикаций за последние 20 лет показывает, что сегодня в методе АЭ основная ставка делается на методы кластеризации. Это связано с тем, что в зависимости от условий регистрации АЭ и уровня окружающего фона граничные (дискриминантные) значения априори известных информационных признаков (параметров) могут изменяться, что приводит к сбою классификационных алгоритмов. Кластерные алгоритмы в этом случае имеют некую возможность адаптироваться, поскольку основаны на процедурах упорядочивания данных без привязки к количеству кластеров (состояний) и значениям их оценочных параметров [188]. Также алгоритмы кластеризации не навязывают ограничения на вид сравниваемых объектов, что позволяет рассматривать данные любой природы. Кроме этого часто кластеризация предшествует классификации. Такая ситуация возникает в случае затруднения или невозможности выделения количества подмножеств (классов, групп, состояний), существующих в выборке, или необходимости уточнения их количества.

Ядром кластерного анализа данных (в том числе и АЭ) сегодня является двухэтапная процедура (не считая этапов подготовки данных, визуализации результатов и оценки их правдоподобия) [6, 188]. Первый этап состоит в определении степени близости между подмножествами в множестве данных (выборке) с помощью определенной статистической меры близости или схожести. Итогом данного этапа является получение матрицы расстояний (матрицы сходства) в системе информативных координат сравнения (чаще многомерной), а основными средствами сравнения являются следующие статистические меры (индексы, ранги) расстояния, расхождения или правдоподобия: Эвклида (Euclid); Махаланобиса (P. Ch. Mahalanobis), Минковского (H. Minkowski), манхэттенское (городских кварталов), Чебышева, Хемминга (R.W. Hamming), Пирсона (C. Pearson), Колмогорова-Смирнова, Уитни-Манна (D.R. Whitney - H.V. Mann), корреляции, Кульбака-Лейблера (S. Kullback - R.A. Leibler), Данна (J. C. Dunn); Бхачаттария (A.K. Bhattacharya), Хеллингера (E.D. Hellinger), Дженсена-Шеннона (J.L.W.V. Jensen - C.E. Shannon), Дэвиса - Боулдина (D.L. Davies - D.W. Bouldin) и др. Второй этап состоит в итерационном структурировании матрицы расстояний так, чтобы объекты сравнения разделились на подмножества максимально не похожие друг на друга снаружи, но состоящими из максимально подобных объектов внутри. Основными средствами группировки (кластеризации) объектов сравнения являются следующие алгоритмы объединения или поиска связи в данных: k -средних; k -медиан; C -средних; самоорганизующиеся карты Кохонена (Self-Organizing Map (SOM) Т.К. Kohonen); SL (Single Linkage); CL (Complete Linkage); метод Уорда (J.H. Ward); EM

(Expectation-Maximization); *LDA* (Linear Discriminant Analysis); *UPGMA* и *WPGMA* (Unweighted и Weighted Pair Group Method with Arithmetic mean); *UPGMC* и *WPGMC* (Unweighted и Weighted Pair Group Method with Centroid average); *FOREL* (FORmal ELeмент); *DBSCAN* (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise); *GA* (Genetic Algorithm) и др. В том числе разработаны автоматические алгоритмы кластеризации [196-198 и др.], что представляет собой уже самодостаточные средства машинного обучения или искусственного интеллекта.

Активный интерес в методе АЭ к алгоритмам кластеризации определяется осознанием того, что на сегодняшнем уровне его развития, уже недостаточно знать опасен или не опасен источник АЭ для конструкции, а требуется понимание его физической природе происхождения, т.е. умение определять вид (тип) источника (дефекта) по АЭ данным. После решения этой задачи возможно перейти к следующему вопросу измерения (оценки) размера (масштаба) дефектов по АЭ данным. Такой путь открывает большие перспективы методу АЭ не только в системе НК (т.к. исключает необходимость подтверждения результатов АЭ контроля другими методами НК, что делает метод АЭ самостоятельным и позволяет перейти от дефектоскопии к дефектометрии), но и в исследовательском направлении его применения. Последнее обусловлено отсутствием методов непрерывного наблюдения за изменением структуры материалов при их нагружении в реальном времени.

Положительные примеры применения алгоритмов классификации и кластеризации в других областях науки и техники показывают, что они могут позволить расширить возможности метода АЭ за счет:

- упрощения обработки данных и принятия решений путем работы с каждым кластером по отдельности (концепция «разделяй и властвуй»). Это позволяет как выявить объект (источник) и следить за его развитием по времени наблюдения, так и удалять (фильтровать) не исследуемые источники по кластерным признакам;
- сокращения объема хранения (сжатие) данных путем сохранения либо по одному типичному представителю каждого кластера, либо среднего образа кластера;
- поиска новых объектов, путем обнаружения и выделения нетипичных данных (объектов, не подходящих по параметрам заданным/известным кластерам);
- порождения или проверки научных гипотез на основе понимания присутствия (отсутствия) выделенных кластеров в исследовательских данных.

Однако сегодня нет математически аргументированных правил к выбору: способа разделения данных на классы, статистических мер подобия (метрик, расстояний) и

подбору их величин. Учитывая, что каждый возможный вариант имеет свои «преимущества» и «недостатки», то под каждую практическую задачу оператором (исследователем) приходится подбирать, как способ кластеризации, так и статистическую меру подобия. При этом на сегодняшний день практическая апробация остается основным подтверждением правильности выбора и настройки алгоритма кластеризации данных. Поэтому для исследования возможности применения в предлагаемом методе выбираем три перспективных алгоритма, которые уже имеют положительные примеры анализа АЭ шумоподобного вида. Первый, алгоритм [194], основанный на оценке скорости изменения активности и дисперсии АЭ, реализуется на основе интегральных параметров, имеющих легкий счет (не требуют больших вычислительных ресурсов). Однако, в виду того, что первый алгоритм в работе [194] не имеет четкого описания порядка и сути его выполнения, то в него были внесены два изменения которые подробно изложены в п. 4.3.2 Главы 4. Второй, алгоритм [199], основанный на оценке подобия форм кривых СПМ с применением коэффициента достоверности аппроксимации (R -квадрат), напрямую позволяет реализовать подход рассмотренный в п. 2.2 Главы 2. Для объективности в качестве третьего выбран алгоритм, основанный на анализе АЭ образов в многомерном пространстве информативных признаков в амплитудной и частотной областях. При этом сегодня на практике лучше всего зарекомендовали себя гибридные алгоритмы на основе k -средних, где для первоначального разбиения данных на группы (кластеры) достаточно гипотезы о наиболее вероятном количестве кластеров или результата разбивки данных более грубым методом, которые затем подвергаются финальной обработке методом k -средних. Кроме этого, метод k -средних относится к быстрым алгоритмам, относительно прост в реализации, имеет некоторую устойчивость по отношению: к шумам и выбросам, некорректному выбору метрики и наличию незначимых (малозначимых) переменных в выборке, а также имеет модификацию для кластеризации АЭ данных в режиме реального времени [197]. Подробное описание выбранных алгоритмов приведено в Главе 4.

Известно [188], что число вариантов кластеризации объектов сравнения N на K группы (кластеры) равно:

$$M(N, K) = \frac{1}{K!} \sum_{i=1}^K (-1)^i \cdot \binom{K}{i} \cdot (K - i)^N, \quad (3.36)$$

Из (3.36) видно, что кластеризация с полным перебором многопараметрических данных требуют вычислений экспоненциально размерности сравнения. Поэтому, чтобы снизить количество вычислений и объем хранимых данных необходимо

минимизировать количество объектов сравнения (информативных параметров). При этом поскольку процесс разделения (группировки, кластеризации) данных носит субъективный характер, так как зависит от: вида выбранных объектов сравнения (пространства сравнения); полноты и качества исходных данных (наличия пропусков и погрешности при получении объектов сравнения); нелинейность взаимосвязей в сравниваемых данных; правильности определения количества кластеров и характеристик, описывающих их; выбора базового элемента для начала сравнения; свойств алгоритма кластеризации (кластеризация снизу вверх или сверху вниз, по ближним соседям или дальним, растягивающая или сжимающая пространство сравнения и др.), а также величин настроечных параметров алгоритма кластеризации. Поэтому требуется выбор информативных параметров и оценка эффективности их применения на реальных (а не модельных) выборках данных с обязательным применением внешних (независимых) методик перепроверки (верификации) результатов кластеризации.

3.7. Критерии оценки класса опасности шумоподобных источников акустической эмиссии

Ранее в п. 3.6 Главы 3 были описаны существующие пороговые критерии оценки класса опасности источников АЭ. Среди них на первых порах адаптируемым для беспорогового применения представляется амплитудный критерий, т.к. амплитуда сигнала является параметром независимым (устойчивым) к уровню порога [6] и может быть рассчитан для шумоподобной АЭ (п. 3.4 Глава 3). В п.1.5 Главы 1 было показано, что амплитуда сигнала АЭ связана с размером источника, т.е. чем больше величина амплитуды сигнала, тем значительнее размерный масштаб события, инициирующей АЭ. Результаты, полученные в наших экспериментах по исследованию шумоподобной АЭ, согласуются с выводами указанных литературных источников, так как замечено, что амплитуда шумоподобной АЭ также возрастает по мере приближения к критическому уровню режима работы или повреждению элементов оборудования. Однако в условиях шума, близкого или превышающего значение допустимой амплитуды A_t [6, 10] (низкое соотношение сигнал/шум), критерий будет сбиваться при каждом достижении сигналом величины A_t , что приведет к постоянному ложному срабатыванию тревоги. Также в этом случае становится не рабочей локационная карта, которая покрывается множеством ложных АЭ событий, что не позволяет выделить сигналы от истинных источников. Следовательно, амплитудный критерий, несмотря на устойчивость параметра к порогу

дискриминации, для оценки и классификации шумоподобной АЭ применим весьма ограниченно.

Теоретически, также представляется адаптируемым локально-динамический АЭ-критерий, являющийся модификацией критерия Данегана, в основу которого положена степенная зависимость суммарного счета дискретной АЭ от коэффициента интенсивности напряжений [6]. Последний параметр при модификации критерия Данегана для промышленного применения был заменен на обобщенный параметр нагружения [6]. Еще одним важным изменением при модификации критерия был переход от суммарного счета к суммарной энергии АЭ, т.к. параметр «энергия АЭ», по сути, представляет собой амплитуду в квадрате по времени, поэтому в беспороговом режиме анализа АЭ не только сохраняет преимущества, указанные выше для амплитуды сигнала, но и усиливает их. Однако недостатком этой модификации также является неработоспособность критерия в случае зашумленных условиях испытаний, когда амплитуда дискретных сигналов АЭ сопоставима с уровнем технологических шумов или при шумоподобной АЭ. В этом случае происходит искажение степенной зависимости. При малом искажении зависимости возникает ошибка определения степени (класса) опасности источника АЭ. В пределе искажения степенная зависимость переходит в линейную становясь пропорциональной частоте разбивка потока данных на кадры, тогда ложно присваивается постоянный активный статус источнику АЭ. Следовательно, данный подход также не решает проблемы оценки класса опасности шумоподобной АЭ.

Критерий непрерывной АЭ, введенный в [10] для выявления разгерметизации и течи в стенке объекта контроля, также не приемлем, поскольку подразумевает существование двух состояний: отсутствие и регистрацию непрерывной (шумоподобной) АЭ, превышающей заданный амплитудный уровень. В беспороговых условиях анализа шумоподобной АЭ данный критерий будет показывать только состояние регистрации непрерывной АЭ.

Таким образом, в настоящее время нет критериев оценки класса опасности, адаптируемых для классификации шумоподобных сигналов АЭ, регистрируемых в беспороговом режиме. Поэтому для реализации I уровня анализа АЭ, предлагаемого в п. 2.4 Главы 2 метода иерархического анализа шумоподобной АЭ, решено устанавливать классы опасности источникам (АЭ кластерам) исходя из тяжести повреждений, которые они наносят объекту контроля. В Главе 2 было показано, что кривая СПМ связана с типом АЭ источника, следовательно, благодаря этому знанию, можно судить опасен ли

данный источник для объекта контроля или нет. Следовательно, начало регистрации сигналов, относящихся к кластеру критического АЭ источника, уже может являться признаком опасного состояния объекта контроля. Поэтому перед применением предлагаемого метода необходимо определить виды возможных опасных источников (механизмов повреждения), затем ранжировать их по степени опасности для объекта контроля и установить их АЭ признаки. Для этого могут быть использованы предложенные методы получения опорных данных (п. 2.5 Глава 2), что будет продемонстрировано далее в примерах апробации предлагаемого метода анализа шумоподобной АЭ (Главы 5 и 6), поэтому здесь на нем подробнее останавливаться не будем.

II уровень анализа предлагаемого метода оценки близости критического состояния динамического промышленного оборудования (п. 2.4 Глава 2) заключается в оценке класса опасности АЭ по ее изменению за рабочий цикл. На сегодняшний момент нам не известны критерии оценки класса опасности шумоподобных источников АЭ, пригодные для применения на II уровне анализа, поэтому потребовалось их разработка. В рамках выполнения работы был разработан способ оценки степени опасности источников по изменению АЭ за цикл нагружения (Приложение Е) и два критерия для его реализации. Отличительным признаком разработанного способа и критериев является то, что они инварианты и могут применяться к следующему набору исходных данных: кривой изменения амплитудно-волновой формы АЭ; кривым изменения активности АЭ кластеров и кривым спектральной плотности мощности, полученной частотно-временным преобразованием, как амплитудно-волновой формы АЭ, так и кривых изменения оценочных АЭ параметров. При этом результат их применения приведен к официальной системе классификации АЭ источников в виде четырех классов: I – пассивный; II – активный; III – критически активный и IV – катастрофически активный [6, 10].

3.7.1. Кластерно-энергетический критерий

Выше было отмечено, что при уровне шума, сопоставимого с уровнем сигнала параметр энергия АЭ может потерять свою чувствительность к изменению процесса, если ее рассчитывать на временном окне, сопоставимом с длительностью сигнала. Однако, если перейти к оценке изменения энергии АЭ, регистрируемой за рабочий цикл (II уровень анализа по п. 2.4. Главы 2), то такой прием позволяет установить приращение энергии при приближении к критическому повреждению или разрушению

материала/элемента/узла объекта контроля. Кроме этого, срабатывание источника АЭ (особенно периодического) приводит к перекошу/асимметрии или другому искажению формы кривой изменения энергии сигналов АЭ за цикл, которое может быть установлено с точностью до времени разбивки АЭ на кадры. Таким образом, сравнение самой формы кривой изменения энергии сигналов от времени в пределах цикла рабочего процесса также может быть информативным параметром, свидетельствующим о наличии критического источника АЭ (дефекта, повреждения) или о изменении технического состояния объекта контроля. Обозначенные два признака и вошли в основу классификации приближения состояния материала/элемента/узла объекта контроля к разрушению при его циклическом нагружении по данному АЭ критерию, который реализуется следующим образом.

После разбивки непрерывной записи АЭ на кадры (фреймы) длиной, сопоставимой со средней длительностью АЭ сигналов, проводится расчет энергии (мощности) для каждого кадра записи АЭ. Затем учитывая, что процесс накопления повреждений сильно растянут по времени (особенно на ранней стадии развития повреждения), приращение энергии в циклах может быть ничтожно малой величиной по сравнению с полной энергией цикла. Поэтому далее проводится процедура увеличения значимости изменения (приращения) энергии АЭ в цикле путем применения следующего математического приема:

$$\Delta e = \frac{E_{C_i}}{\bar{E}_{C_0}} - \frac{E_{C_{i-1}}}{E_{C_i}}, \quad (3.37)$$

В формуле (3.37): Δe – показатель приращения энергии в цикле; \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 в текущем и предыдущем рабочем цикле. Таким образом, факт приращения энергии в цикле подтверждается на противопоставлении отношений текущего значения к начальному и предшествующему значениям. Далее для случая $E_{C_{i-1}} \approx \bar{E}_{C_0} \approx E_{C_i}$ вводится пороговое значение z (т.е. $\Delta e < z$), при котором считается, что повреждения объекта контроля нет или оно не критично. При возникновении повреждения объекта контроля начального уровня, но уже влияющего на его техническое состояние, отличие между энергиями в циклах становится более существенным и увеличивается по мере развития повреждения, т.е. $E_{C_i} > E_{C_{i-1}} > \bar{E}_{C_0}$ тогда в формуле (3.37) имеем $E_{C_i} / \bar{E}_{C_0} > 1$, $E_{C_{i-1}} / E_{C_i} < 1$ и Δe принимает

значения в диапазоне $z < \Delta e < 1$. При выходе повреждения объекта контроля на стадию стабильного роста, что считаем уже критической ситуацией, величина энергии в цикле стремиться к максимальному значению (сопровождающему разрушение или выход из строя), следовательно: $E_{Ci} \approx E_{Ci-1} \gg \bar{E}_{C0}$, тогда $E_{Ci} / \bar{E}_{C0} \gg 1$, $E_{Ci-1} / E_{Ci} \approx 1$ и $\Delta e > 1$.

Таким образом, показатель приращения энергии Δe является первой классификационной характеристикой кластерно-энергетического критерия и в первом приближении позволяет установить отклонение от начального технического состояния объекта контроля. Однако он не позволяет установить тип источника АЭ и стадию повреждения, поэтому понадобился второй классификационный признак, которым является форма кривой изменения энергии АЭ за цикл. Она, на первом этапе, позволяет пики приращения энергии сопоставить по времени регистрации с фазой/частотой/углом изменения параметрической информации и предположить вид повреждения, исходя из знания конструкции объекта контроля и последовательности выполнения рабочего процесса. На втором этапе, установить/подтвердить тип источника АЭ (повреждения) и стадию его развития путем сравнения формы кривых изменения энергии сигналов АЭ за цикл с применением кластерного анализа. При этом не накладывается ограничений на алгоритм кластерного анализа и могут быть применены, как алгоритмы кластеризации R -квадрат, k -средних, так и другие. Ключевым моментом здесь является то, что подбор критерия сравнения (K_s по п. 2.5 Главы 2) осуществляется таким образом, чтобы каждый кластер критического АЭ признака (c_i , $i = 1, 2, 3 \dots$) алгоритм перерабатывал 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. Соответствие классов опасности изменениям технического состояния материала/элемента/узла АЭ для каждой комбинации Δe и c_{i1} устанавливается в предварительных или модельных испытаниях по методам получения опорных данных, приведенных в п. 2.5 Главы 2, по результатам которых заполняется классификационная таблица 3.5. При АЭ контроле классификация источников АЭ проводится по таблице 3.5, которая здесь показана схематично и заполняется под конкретную практическую ситуацию, что будет показано далее в Главе 5 на реальном практическом примере.

Таблица 3.5

группа цикла по форме кривой АЭ	энергетический коэффициент, Δe		
	$\Delta e < z$	$z < \Delta e < 1$	$\Delta e > 1$
c_{11}			
c_{12}			
c_{13}			
...			
c_{i1}			
c_{i2}			
c_{i3}			

3.7.2. Частотно-энергетический критерий

Из описания кластерно-энергетического критерия видно, что его применение требует объемных вычислений особенно при использовании достаточно большого пространства признаков сравнения. Последнее может ограничить возможность его использования в режиме реального времени, поэтому для быстрого счета была разработана его вариация, названная частотно-энергетическим критерием. Суть данного критерия состоит в том, что для оценки АЭ используется синхронное отслеживание изменения двух параметров: «энергии» или «мощности» параллельно с «медианной частотой». Экспериментально показано, что взаимное сравнение данных параметров на одном поле или синхронное наблюдение за их изменением во время нагружения материала/конструкций позволяет идентифицировать либо этапы накопления повреждений в объекте контроля, либо переход масштаба его разрушения на более высокий уровень. Это многократно подтверждалось на разных материалах при их разрушении в условиях: пластической деформации [25, 179, 200]; провоцирования роста трещины [121, 199, 201, 202]; внедрения твердого тела [203]; охрупчивания после воздействия температуры и среды [204]; трения и изнашивания [205, 206] и при истечении жидкости или газа через несплошность [207, 208]. В обозначенных работах показано, что изменение спектральных характеристик АЭ происходит либо за счет приращения энергии в локализованной части спектра, либо за счет перераспределения энергии между частотными составляющими, что и отображает комбинация параметров «энергия - медианная частота». Подробный анализ условий, влияющих на изменение указанных оценочных параметров, проведен в работах [179, 200, 206].

Частотно-энергетический критерий, также применяется при условии циклического (периодического) изменения нагруженности объекта контроля (весом, давлением, температурой и т.д.) и реализуется следующим образом. Для группы сигналов или

каждого источника АЭ, выявленных с применением локационного, кластерного или др. способа идентификации АЭ событий рассчитывается энергетический (k_E) и частотный (k_f) коэффициенты, соответственно показывающие приращение энергии и медианной частоты между начальным (E_{n0} и f_{m0}) и последующим состоянием объекта контроля (E_n и f_{mn}) по следующим формулам:

$$k_E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{E_{in}}{E_{in0}} \right), \quad (3.38)$$

$$k_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{f_{imn}}{f_{im0}} \right), \quad (3.39)$$

В (3.38) и (3.39) N – параметр усреднения (интервал расчета), который может составлять, как несколько кадров, так и несколько циклов. При сравнении циклов для повышения объективности оценки анализа АЭ за N принимается некоторое количество начальных циклов нагружения объекта контроля и такое же количество циклов нагружения при некотором последующем времени наблюдения. При этом полагается, что материал/элемент/узел объекта контроля на начальном участке, выбранном для сравнения, либо не содержит развивающихся дефектов, либо они находятся на таком этапе развития, который не влияет на техническое состояние объекта контроля и не приводит к изменению АЭ.

Класс опасности источника АЭ или выявление отклонения в режиме работы объекта контроля устанавливается по значениям k_E и k_f . При этом в зависимости от соотношения величин энергии и медианной частоты АЭ между сравниваемыми циклами возможны следующие девять комбинаций взаимного изменения k_E и k_f : ($k_E = 1, k_f = 1$); ($k_E = 1, k_f > 1$); ($k_E = 1, k_f < 1$); ($k_E > 1, k_f = 1$); ($k_E < 1, k_f = 1$); ($k_E > 1, k_f > 1$); ($k_E < 1, k_f < 1$); ($k_E > 1, k_f < 1$); ($k_E < 1, k_f > 1$). Соответствие классов опасности изменения технического состояния материала/элемента/узла АЭ для каждой комбинации k_E и k_f устанавливается в предварительных или модельных испытаниях по методам получения опорных данных, приведенных в п. 2.5 Главы 2, по результатам которых заполняется классификационная таблица 3.6. При АЭ контроле классификация источников проводится по таблице 3.6, которая здесь показана схематично и заполняется под конкретную практическую ситуацию, что будет показано далее в Главе 5 на реальном практическом примере.

Таблица 3.6

Частотный параметр	Энергетический параметр		
	$k_E < 1$	$k_E = 1$	$k_E > 1$
$k_f = 1$			
$k_f > 1$			
$k_f < 1$			

Выводы по главе 3

1. Применение этапа кластеризации в современных алгоритмах анализа АЭ данных, теоретически позволяет установить физическую природу нескольких источников АЭ, их мощность и время проявления (действия), благодаря чему открываются новые перспективы совершенствования метода АЭ в системе НК. Поэтому развитие кластеризационных подходов обработки и анализа АЭ данных является отдельным актуальным научно-техническим направлением.
2. Для описания шумоподобной АЭ, регистрируемой в беспороговом режиме, большинство пороговых оценочных параметров не пригодно, поэтому следует применять статистические параметры оценки АЭ как в амплитудной, так и в частотной областях.
3. Наиболее перспективными методами кластеризации (классификации) АЭ являются алгоритмы, отслеживающие изменение: скорости и ускорения регистрации АЭ; формы кривой спектральной плотности мощности и многопараметрический образ АЭ кластеров, включающий оценочные параметры в амплитудной и частотной областях.
4. Кластерный алгоритм анализа АЭ данных должен иметь средства верификации результатов, как внутренние (например, внутригрупповой и межгрупповой анализ результатов или параллельное использование нескольких алгоритмов обработки со сравнением полученных ими результатов и т.д.), так и внешний (например, использование анализа технологической информации или имитации рабочих режимов с известными параметрами и т.д.).
5. Впервые разработаны критерии оценки класса опасности шумоподобных источников в беспороговом режиме регистрации АЭ.

Глава 4. Объекты и методы исследований

4.1. Объекты исследований

4.1.1 Тестовые акустико-эмиссионные сигналы с частотно-временными реперами

В п. 5.1 Главы 5 для экспериментального сравнения эффективности применения пяти частотно-временных преобразований (ЧВП) использованы модельные сигналы трех видов: первый – синтезированный из синусоид строго заданного частотного диапазона с интегрированной дельта-функцией; второй – экспериментально полученный сигнал дискретной АЭ, разложенный в акустическом канале на дисперсионные моды и третий – экспериментально полученный сигнал непрерывной АЭ от истечения воздуха через калиброванное отверстие. Указанные три типа модельных сигналов показательны, т.к. позволяют задать частотно-временные трансформации внутри сигналов с точно определенными метками (реперами) по времени и частоте. Кроме этого данные виды модельных сигналов являются типовыми для исследования эффективности различных алгоритмов обработки в теории сигналов и методе АЭ [6, 150, 168, 169].

Первый модельный сигнал (рисунок 4.1а), синтезирован на компьютере и имеет четыре части. Первая часть ($t_1 \div t_2 = 0 \div 830$ мкс) представляет собой синусоидальный сигнал постоянной амплитуды с линейно изменяющейся частотой от $f_1 = 90$ до $f_2 = 180$ кГц (Sine Sweep-сигнал или Shirp-сигнал). Вторая часть ($t_2 \div t_3 = 830 \div 1460$ мкс) – синусоида частотой $f_2 = 180$ кГц. Третья часть ($t_3 \div t_{rec} = 1460 \div 2000$ мкс) – синусоида частотой $f_3 = 365$ кГц. Четвертая часть сигнала – δ -функция Дирака (Dirac P.A.D.), вставленная в третью часть сигнала на $t_4 = 1770$ мкс. Таким образом, результат ЧВП первого модельного сигнала наглядно отобразит погрешность расчета частоты относительно жестко математически заданных значений при избыточном количестве отсчетов в сигнале (соотношение [частота дискретизации / максимальная частота спектра] = 4).

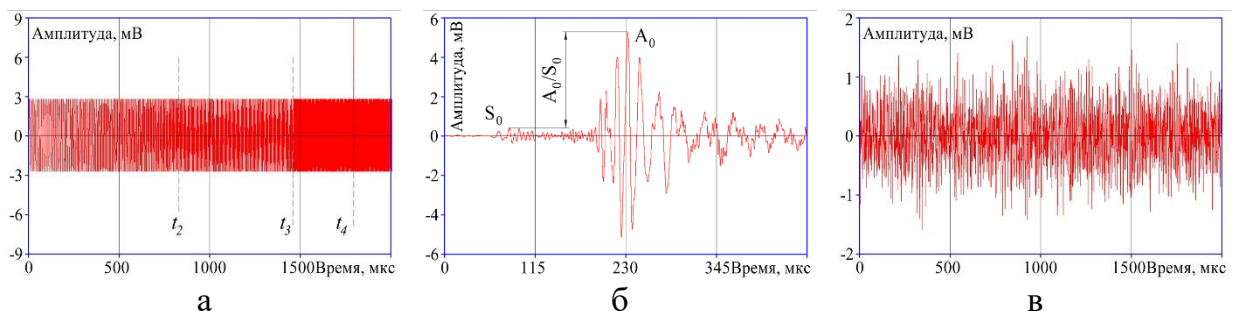


Рисунок 4.1. – Общий вид: синтезированного сигнала (а), сигнала от источника Су Нельсона (б) и сигнала от истечения воздуха через отверстие (в).

Второй и третий модельные сигналы (рис. 4.1а и 4.1б), получены на универсальном учебно-исследовательском стенде (УУИС), подробное описание которого приведено в п.

7.4 Главы 7 и [А4, А26]. При этом второй сигнал генерировался имитатором Су Нельсона [6, 10] и претерпел дисперсию при распространении на расстояние 1 м в стальной стенке макета сосуда давления (объемного макета) толщиной 8 мм. Третий модельный сигнал представляет собой запись акустического шума, сопровождающего истечение воздуха через отверстие диффузора $\varnothing 0,75$ мм с перепадом давления 0,4 МПа. Регистрация АЭ сигналов 2 и 3 типа с УУИС проводилась системой A-Line 32D состав и условия записи приведены в п. 4.2 Главы 4.

Полученные модельные сигналы позволяют исследовать частотно-временные трансформации, т.к. имеется точное знание их положения по времени и частоте. Так, первый модельный сигнал позволяет наглядно показать погрешность расчета относительно жестко заданных частот f_j и временных точек их изменения в сигнале t_i , где: i и $j = 1 \dots 4$ (указаны выше для каждого изменения). Второй – правильность оценки дисперсионного разложения сигнала на две главные нулевые моды (A_0 – ассиметричная, S_0 – симметричная) волн Лэмба (Н. Lamb), которые для объекта в виде пластины хорошо поддаются расчету. Расчет проводили по [209] с последующим переводом дисперсионных кривых в координаты частота/время и наложением на спектрограмму способом [150]. При этом расстояние между источником и преобразователем АЭ выбиралось так, чтобы их амплитуды значительно отличались друг от друга ($A_0/S_0 \sim 5$ раз (14 дБ) по амплитуде или $\sim 5^2 = 25$ раз по энергетическим параметрам). Здесь контрольными параметрами являются время прихода A_0 и S_0 мод по их пиковым значениям (соответственно t_{A_0} и t_{S_0}), зная которые можно установить величину соотношения их пиковых энергетических значений A_0/S_0 в амплитудной и частотных областях (где A_0/S_0 заменяется отношением пиковых значений спектральной плотности мощности (G_{A_0}/G_{S_0}) вблизи t_{A_0} и t_{S_0} , соответственно).

Третий вид модельного сигнала представляет собой шумоподобный источник в виде чередующихся пульсаций (пачек сигналов) уплотнения и разряжения выходящего через жиклер воздуха, резонансные частоты которых подчиняются закону кратности обертонов [15]. Поэтому, из-за близости амплитуд пачки сигналов плохо различимы в амплитудно-временной области, но хорошо в частотно-временной. При этом минимальное искажение пачек достигалось установкой ПАЭ (записью АЭ) непосредственно в месте истечения воздуха (вблизи жиклера). Здесь контрольными параметрами являются значения основной частоты АЭ (f_0) и ее первой и второй гармоник ($f_1 = 2 \cdot f_0$ и $f_2 = 3 \cdot f_0$), и f' – ложные частоты или артефакты, которые возникли при ЧВП. При расчете по [15] для гладкого

канала диаметром диффузора и перепада давления, указанного выше, получено $f_0 = 93$ кГц, $f_1 = 186$ кГц, $f_2 = 279$ кГц.

4.1.2. Акустическая эмиссия при трении и изнашивании материалов

Сигналы АЭ использованные для акустических исследований и апробации предложенного метода в п. 5.2 Главы 5 и п.6.1 Главы 6 в направлении идентификации основных источников при трении и изнашивании различных материалов получали на трех машинах трения: ЧМТ-1 (НПО «Нефтехимавтоматика», г.Рязань); TRB-50N (Nanovea, США) и УМИТИ (ОАО «АвтоВАЗ», г.Тольятти), реализующих, соответственно, схемы трибологических испытаний: четырехшариковый контакт (рисунок 4.2а); цилиндр-на-диске (рисунок 4.2б) и цилиндр-на-кольце (рисунок 4.2в).

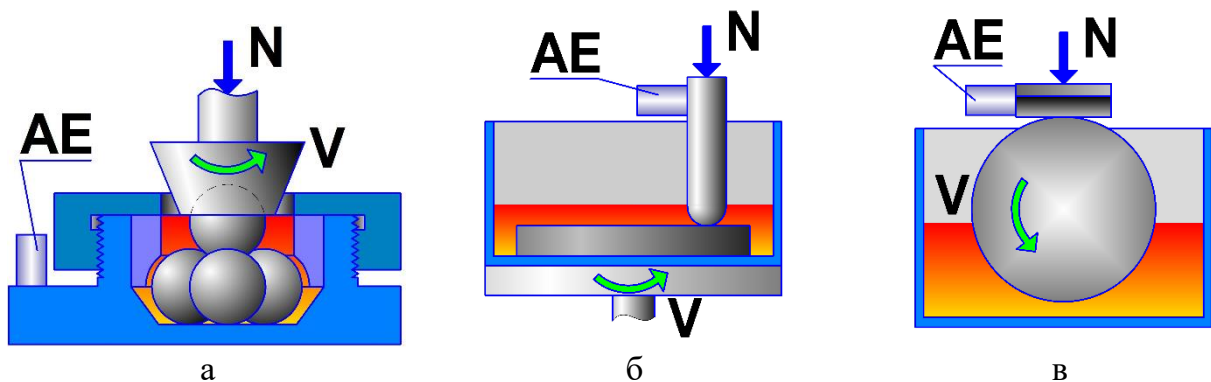


Рисунок 4.2 - Принципиальные схемы трибологических испытаний и записи АЭ: где: N – нагрузка, V – направление вращения подвижного элемента трибоузла, АЕ – преобразователь АЭ.

Для акустических исследований, описанных в п.5.2 Главы 5, АЭ получали при сопровождении стандартных трибологических испытаний, которые проводились на машине трения ЧМТ-1 на ОАО «АвтоВАЗ» в диапазоне изменения нагрузок $59 \div 7840$ Н $\pm 1\%$ с шагом, предписанным в [210] при скорости вращения $n = 1460 \pm 70$ об/мин. Время нагружения $t = 10,0 \pm 0,2$ с. Подробное описание методики испытаний приведено в [210]. Поэтому здесь лишь отметим, что ее выбор определялся тем, что она стандартизирована и имеет высокую воспроизводимость результатов испытаний, а также четкую систему распознавания, оценки и категорирования повреждений. Также выбранная методика является приемочной при оценке качества смазочных материалов, поэтому имеет широкое распространение. Это обеспечило сравнение полученных результатов с данными других исследователей, что повысило достоверность выводов. Характеристики смазочных и наименование контактных материалов, и весь объем трибологических испытаний АЭ, данные которых использованы при исследованиях сведены соответственно в таблицу 4.1 и 4.2. Однако помимо испытаний, указанных в таблице 4.2,

были рассмотрены и результаты специальных испытаний по моделированию различных механизмов износа в критических условиях, а также верификации АЭ данных по методу п. 2.5.1 Главы 2. Таким образом, весь спектр рассмотренных испытаний шире приведенных в таблице 4.2, но поскольку полученные в них результаты коррелируют с основной серией, то выводы обобщены по всем испытаниям, а описание приводится только основной серии.

Таблица 4.1

Обозначение	Тип смазки	Базовое масло	Загуститель	Твердая присадка	ν , сСт (+40°C)	Π , 10 ⁻¹ мм (+25°C)	Трибологические характеристики [210] (+25°C)		
							I_z , Н	P_k , Н	P_c , Н
L1	Ж	М	–	–	90	–	970	1190	1880
L2	П	М	Li	–	50	320	310	800	1780
L3	П	М		–	65	230	280	630	1600
L4	П	М		–	115	235	300	710	2240
L5	П	С		–	25	320	360	840	2370
L6	П	М	Li	+	150	270	770	1200	6300

Примечание: Π – пластичная (консистентная) смазка, Ж – жидкая смазка, М – минеральное масло, С – синтетическое, Li – литиевое мыло, ν – вязкость базового масла, П – число пенетрации, I_z – индекс задира (load-wear index), P_k – критическая нагрузка (last nonseizure load), P_c – нагрузка сваривания (weld load)

В таблицах 4.1–4.3 обозначено: сухое трение (D); смазка для тяжело нагруженных узлов трения ШРУС-4М (минеральная основа, Li загуститель, присадка MoS₂ 10% - обозначена, как L6); универсальная смазка на синтетической основе с Li загустителем Renolit JP1619 (L5) и три универсальные многоцелевые смазки на минеральной основе с Li загустителем Фиол-1, Литол-24 и Unirex-3 являющиеся заменителями друг друга (соответственно обозначены L2, L3 и L4); дистиллированная вода (W); жидкое моторное минеральное масло Lukoil-Standard с индексом вязкости 10W-40 (L1).

Таблица 4.2

Контактные материалы ¹	Нагрузка, Н	Условия смазки ²	PV-фактор ³ , Н/мм ² ·м/с	Напряжение в контакте по Герцу, МПа ⁴
ШХ15/ШХ15	10	D, W, L1÷L6	309	944
	59	D, W, L1÷L6	562	1716
	196	D, W, L1÷L6	839	2563
	392	D, W, L1÷L6	1057	3229
	491	D, W, L1÷L6	1139	3478
	530	D, W, L3	1168	3569
	618	D, W, L1÷L6	1230	3757
	657	L2, L3, L4	1255	3835

Контактные материалы ¹	Нагрузка, Н	Условия смазки ²	PV-фактор ³ , Н/мм ² ·м/с	Напряжение в контакте по Герцу, МПа ⁴
	696	L2, L3, L4, L5	1280	3910
	736	L2, L3, L4, L5	1303	3982
	785	D, W, L1÷L6	1332	4068
	824	L2, L5	1353	4135
	883	D, L2, L5	1385	4231
	981	D, W, L1÷L6	1434	4383
	1059	D, W, L1	1472	4496
	1099	W, L1	1490	4551
	1148	W, L1, L6	1512	4618
	1167	W, L1, L6	1520	4644
	1177	W, L1, L6	1524	4657
	1236	W, L1÷L6	1549	4734
	1305	L1, L3, L6	1578	4820
	1383	L1, L3	1609	4914
	1570	L1÷L6	1678	5126
	1746	L1, L2, L3	1738	5311
	1844	L1, L2	1770	5409
	1962	L1, L2, L4, L5, L6	1807	5522
	2070	L1, L4, L5	1840	5621
	2158	L4, L5	1866	5700
	2197	L1, L4, L5	1877	5734
	2325	L4, L5	1913	5843
	2453	L1, L5, L6	1947	5948
	3090	L6	2103	6424
	3924	L6	2277	6957
	4905	L6	2453	7494
	6082	L6	2635	8051
	6180	L6	2649	8094
	7848	L6	2869	8765

Примечания: ¹ – материалы индентора / образца; ² – обозначения условия смазки расшифрованы в тексте; ³ – PV-фактор, произведение нагрузки (удельного давления) на скорость скольжения используемое для оценки работоспособности материалов в узлах трения [211]; ⁴ – максимальное напряжение в контакте по Герцу по [212].

Такой выбор условий смазывания позволил перекрыть широкий спектр условий трения (сухое трение, трение с закипанием среды, граничное трение и трение с погружением в смазочный материал), что, в сочетании с разной нагрузкой, дало возможность имитировать широкий спектр механизмов изнашивания: абразивный износ; адгезионный износ схватыванием; заDIR; сварка трением и их сочетания.

Для апробации предложенного метода в п. 6.1 Главы 6 в направлении идентификации основных источников при трении и изнашивании различных материалов сигналы АЭ получали по всем трем схемам трибологических испытаний. Однако в этом случае трибологические испытания на ЧМТ-1 проводили по оригинальной методике

специальных сравнительных испытаний смазочных материалов предложенной на ОАО «АвтоВАЗ». Методика заключалась в оценке потери защитных свойств смазочных материалов и отличалась от стандартной методики [210] тем, что нагружение одного узла трения (без замены) проводилось непрерывно путем ступенчатого увеличения нагрузки с выдержкой на каждой ступени нагружения 10 сек.

Таблица 4.3

Контактные материалы ¹	Нагрузка, Н	Условия смазки ²	PV-фактор ³ , Н/мм ² ·м/с	Напряжение в контакте по Герцу, МПа ⁴
Четырехшариковая, ЧМТ-1, специальная методика				
ШХ-15/ШХ-15	392/588/981	L2 ÷ L5	1057 ⁵	3229 ⁵
	588/981/1961	L1, L6	1209 ⁵	3692 ⁵
Цилиндр-на-диске, TRB-50N, [213]				
ШХ15/Сталь 20	25	D, L3	199	1776
	35	D, L3	223	1987
ШХ15/Сталь 45	25	D, L3	203	1809
	35	D, L3	227	2024
ШХ15/Р6М5	25	D, L3	206	1840
	35	D, L3	231	2058
Цилиндр-на-кольце, УМИТИ, [214]				
45Х22Н4М3/ Чугун Gh190	20	D, L1, L3	107	610
	40	D, L1, L3	134	769
	60	D, L1, L3	154	880
АМг3/Чугун Gh190	20	D, L1, L3	74	423
	40	D, L1, L3	93	533
	60	D, L1, L3	107	610
Примечания: ¹ – материалы индентора / образца; ² – обозначения условия смазки расшифрованы в тексте; ³ – PV-фактор, произведение нагрузки (удельного давления) на скорость скольжения используемое для оценки работоспособности материалов в узлах трения [211]; ⁴ – максимальное напряжение в контакте по Герцу посчитаны соответственно по [212, 213]; ⁵ – на начало испытания.				

Трибологические испытания на машине трения TRB-50N проводились в Тольяттинском государственном университете по методике [213] на двух нагрузках (таблица 4.3) при скорости вращения диска (пластины) $n = 236$ об/мин на радиусе дорожки трения индентора $r = 6,4$ мм в течение $t = 100$ мин. Индентор представлял собой шар $\varnothing 6,0$ мм, пластина (диск) имела размер $30 \times 40 \times 5$ мм.

Трибологические испытания на машине трения УМИТИ проводили на ОАО «АвтоВАЗ» по методике аналогичной [214] на трех нагрузках (таблица 4.3) при скорости вращения ролика $n = 100$ об/мин в течении $t = 10$ мин. Инденторы представляли собой цилиндры ($\varnothing 8$ мм) образующая которого перекрецивалась с образующей ролика ($\varnothing 50$ мм, ширина 5 мм) под углом 90° .

Материалы пар трения и условия смазывания, использованные для получения АЭ при апробации предложенного метода в п. 6.1 Главы 6 по всем трем схемам испытаний сведены в таблицу 4.3. Средства и условия записи АЭ при трибологических испытаниях приведены в п. 4.2 Главы 4.

При проведении трибологических испытаний измерялись коэффициент трения, износ и проводилась микроскопическая оценка повреждения поверхностей трения. Коэффициент трения измеряли средствами машин трения. Износ и оценку поверхности повреждения проводили по их 2D и 3D сканам полученных с применением инвертированного металлографического микроскопа Axiovert 40 MAT (Zeiss, Германия) со сканирующим столиком, стереоскопического микроскопа Stemi 2000 (Zeiss, Германия) и конфокального лазерного сканирующего микроскопа (КЛСМ) LEXT OLS4000 (Olympus, Япония). 2D сканы оценивали в соответствии с требованиями обозначенных методик трибологических испытаний. 3D сканы оценивали по методике [A15].

4.1.3. Акустическая эмиссия сопровождающая развитие усталостной трещины

Сигналы АЭ, использованные для апробации предложенного метода в направлении идентификации основных источников при наличии усталостной трещины в материале, работающем в циклическом режиме нагружения, получали при лабораторных испытаниях на рост усталостных трещин (п. 5.3 Главы 5) и при промышленном контроле поврежденности цапф сушильных цилиндров (п.6.2 Главы 6) картоноделательных машин (КДМ) на крупнотоннажном целлюлозно-бумажном комбинате (ЦБК).

Испытания на рост усталостной трещины выполнялись на сервогидравлической машине 8802 (Instron, Англия-США) по одноосной знакопостоянной схеме нагружения с использованием двух типов плоских образцов: образец стыкового сварного соединения (рисунок 4.3) и компактные образцы типа СТ (рисунок 5.11 Глава 5).

Образцы сварных соединений представляли собой стыковые двухсторонние швы с полным проплавлением симметрично скошенных кромок типа С25 ГОСТ 5264. Данный тип соединения является основным при сборке оболочковых конструкций, к которым относятся емкостное оборудование химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств, поэтому они были включены в исследования. При этом несущие элементы ответственного емкостного оборудования чаще всего выполняют из стали 09Г2С, а наиболее слабым звеном таких объектов является зона термического влияния (ЗТВ) сварных соединений. Поэтому образцы были изготовлены из стали 09Г2С и для ускорения процесса зарождения трещины и сокращения времени испытаний, а

также гарантированного разрушения образцов в ЗТВ данная зона ослаблялась надрезом. Форма концентратора напряжений в месте ослабления сечения представляла собой клин с радиусом при вершине 0,16 мм (рисунок 4.3а). Концентраторы напряжений изготавливались на электроискровом проволочно-вырезном станке AG400L LN2W (Sodick, Япония) с высокой точностью позиционирования и повторяемостью формы концентраторов. Для исключения возникновения АЭ сигналов, связанных с отслаиванием и разрушением в захватах продуктов коррозии, окалины и других загрязнений поверхности, после изготовления концентраторов напряжений образец проходил поверхностную шлифовку на незначительную глубину. Габаритные размеры образцов: общая длина 200 мм, длина рабочей части 40 мм, сечение между концентраторами напряжений $6 \times 8 \text{ мм}^2$. Внешний вид образцов представлен на рисунке 4.3а.



Рисунок 4.3 – Внешний вид образцов отдельно (а) и на испытательной машине перед циклическими испытаниями при температуре (б) – 296 К и (в) – 233 К (в окне рисунка (а) увеличенный фрагмент места ослабления до снятия слоя окалины и ржавчины)

Компактные образцы типа СТ [161] имели следующие габаритные и рабочие размеры: высота \times ширина \times толщина = $48 \times 50 \times 10 \text{ мм}$; расстояние от точки приложения нагрузки до границы образца по ширине 40 мм. Концентратором напряжений являлся клиновидный вырез высотой 2 мм, длиной 20 мм (от края образца, 10 мм от точки приложения нагрузки) с углом и радиусом при вершине 30° и 0,18 мм соответственно. Образцы вырезались непосредственно из цапфы сушильного цилиндра. При этом направление выреза образцов и концентратора напряжений в них совпадало с направлением роста трещин, приводивших к авариям цапф сушильных цилиндров КДМ ЦБК (рисунки 4.4 и 4.5).

Каждый сушильный цилиндр КДМ является динамическим промышленным оборудованием (частота вращения до 127 об/мин) нагруженный избыточным внутренним давлением (водяной пар $+160 \text{ }^\circ\text{C}$, давление до 0,8 МПа). Сушильные цилиндры имеют собственный вес 6520 кг, а во время работы дополнительно нагружены весом и силой

натяжения сушильного полотна. Конструктивно сушильные цилиндры представляет собой сборочную единицу, состоящую из: барабана, боковых крышек и двух цапф: лицевой и приводной (соответственно правая и левая часть рисунка 4.5). Лицевая цапфа является поддерживающей и нагружена только весом цилиндра. Приводная цапфа помимо удержания весовой нагрузки передает крутящий момент и одновременно является трубопроводом подачи пара и отвода конденсата. Однако по статистике аварий ЦБК несмотря на большую нагруженность приводные цапфы обрываются реже. Места обрыва лицевой и приводной цапф приведены на рисунке 4.4.в и 4.5. Конструктивно цапфы представляют собой единые изделия из стали 20Л, которые изготавливаются из поковок путем точения с последующей термообработкой.

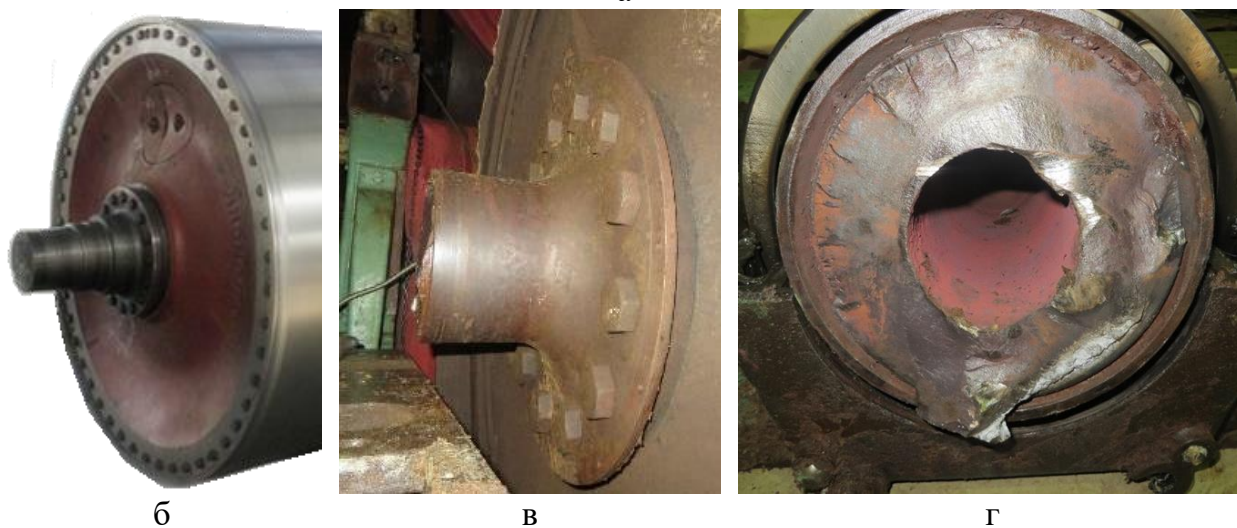
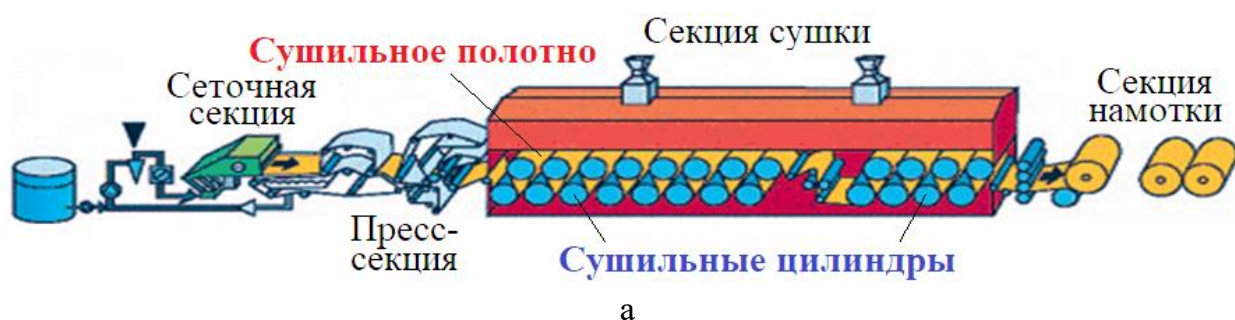


Рисунок 4.4 – Схема картонной машины (а), общий вид сушильного цилиндра с целой цапфой (б), с цапфой после обрыва (в) и излом цапфы (г).

На рост усталостных трещин стыковые сварные соединения испытывались при температуре минус 40 °С (233 К) и +23 °С (296 К), а компактные – при температуре +25 °С (298 К) и +150°С (423 К). Первые температуры позволяют имитировать изменение вязкости разрушения сварных соединений, а вторые температуры являются рабочими для цапф сушильных цилиндров соответственно при остановке на капитальный ремонт и в режиме эксплуатации. Температура образцов во время испытаний обеспечивались климатической камерой SFT3119 (Instron, Англия-США). Выхлаживание образцов в

климатической камере проводилось испарением жидкого азота, подаваемого в камеру. Температура при подготовке к испытаниям и во время испытаний регулировалась непрерывно и автоматически контроллером камеры по термопаре, установленной непосредственно на образце.

Лабораторные испытания на рост усталостной трещины CTOD (Crack Tip Opening Displacement) двух типов образцов проводились в соответствии с [161] в режиме контроля приложенной растягивающей силы, изменяющейся по синусоидальному закону с постоянной частотой $f_p = 10$ Гц с коэффициентом асимметрии цикла ($R = 0,1$). Диапазон нагрузок при испытании сварных соединений составлял $1,8 \div 18,0$ кН, а при испытании компактных образцов $1,0 \div 10,0$ кН. Приращение трещины при испытаниях отслеживалось с помощью тензометрического датчика раскрытия трещины типа 3541-020M-025M-ST (Epsilon Technology, США). Помимо испытаний на рост усталостной трещины объем проведенных исследований материалов включал: химический анализ основного материала с помощью оптико-эмиссионного спектрометра Q4 TASMAR (Bruker, Германия); измерение твердости на твердомере HB-3000B (Time Group, Китай); металлографические исследования с помощью оптического микроскопа Axiovert 40 MAT (Zeiss, Германия) и Stemi 2000 (Zeiss, Германия); испытания на ударную вязкость образцов с U-надрезом испытанные при температуре $+20$ °С на маятниковом копре JB-W300 (Time Group, Китай); статические испытания на разрывной машине H50KT (Tinius Olsen, Англия). Исследование распределения тепла вокруг вершины трещины проводилось в спектральном диапазоне MWB или MWIR ($3,7 \div 4,8$ мкм, $5 \div 150$ °С) с помощью тепловизора SC7700M (FLIR, США) с оптической системой Microscope lens G1 F/2x1. Поле наблюдения составляло $9,6 \times 7,7$ мм (640×512 px), а скорость записи: 25, 50 и 115 кадров в секунду (fps).

В лабораторных испытаниях АЭ регистрировали системами PAC PCI-2 и A-Line 32D состав и условия записи которыми приведены в п. 4.2 Главы 4. При промышленном контроле целостности цапф с каждого сушильного цилиндра КДМ АЭ регистрировалась системой A-Line 32D состав и условия записи которой приведен в п. 4.2 Главы 4, а схема измерений на рисунке 4.5. АЭ контроль проводился во время капитального ремонта непосредственно на КДМ, т.е. без снятия и разбора сушильных цилиндров. Условия проведения АЭ измерений являются цеховыми. Уровень внешнего акустического шума на КДМ во время капитального ремонта в частотном диапазоне регистрации АЭ 30-500 кГц показали среднее значение 33 дБ, а максимальное 38 дБ. Измерение затухания АЭ волн в цапфах показали среднее значение 45,5 дБ/м, что является достаточно высокой

величиной, но при этом характерной для литых и кованных изделий. Максимальное расстояние между ПАЭ и контролируемой зоной составляло 315 мм, т.о. следует ожидать уменьшение амплитуды волны при ее распространении на 14,3 дБ. Следовательно, в данных условиях измерений (фоновый шум + затухание) источник на лицевой цапфе будет обнаружен если его амплитуда более 40 дБ, а на приводной цапфе – если более 52,3 дБ.

Нагружение цапф во время контроля осуществляется вращением сушильных цилиндров через их привод, что обеспечивает периодическую перекидку веса и последовательное нагружение цапф по образующим со сжатием волокон в верхней части, растяжением волокон в нижней части и разгрузкой в средней части цапф. Такой режим при наличии трещины провоцирует движение ее берегов. График нагружения цапф за один оборот представлен на рисунке 4.6. При этом полное АЭ измерение представляет собой запись пяти оборотов по обозначенному графику нагружения.



Рисунок 4.5 – Схема конструктивного исполнения сушильного цилиндра с указанием мест излома цапф и мест установки преобразователей АЭ.

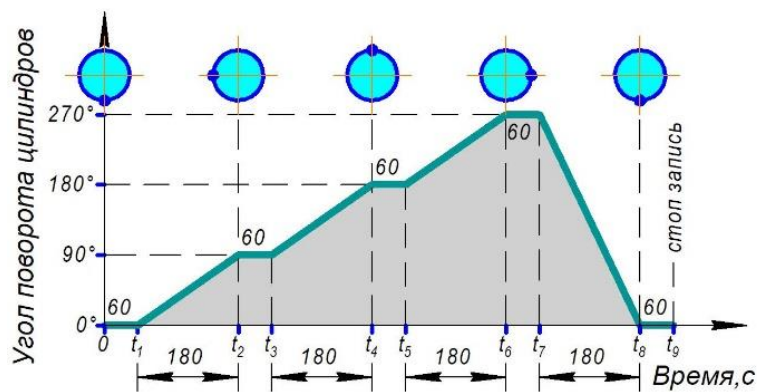


Рисунок 4.6. – График нагружения цапф сушильных цилиндров (один оборот).

При проведении работ по п. 6.2 Главы 6 результаты АЭ контроля цапф сушильных цилиндров сразу же подтверждали ультразвуковым контролем на прямом луче по методике [215] с помощью дефектоскопа Томографик УД-4Т (ООО «ВОТУМ», г.Москва)

с пьезопреобразователем П111-2,5-К20 (прямой, контактный, совмещенный, эффективная частота 2,5 МГц, размер рабочей поверхности Ø20,0 мм).

4.1.4. Акустическая эмиссия при истечении жидкой и газовой среды через несплошность

Сигналы АЭ, использованные для апробации предложенного метода в направлении идентификации основных источников при истечении (утечки) жидкой и газовой среды из замкнутого объема через несплошность, получали при экспериментальных исследованиях на универсальном учебно-исследовательском стенде (УУИС) с имитаторами течи среды в стенке сосуда и при промышленных гидравлических испытаниях резервуара хранения щелочи.

Имитация и исследование АЭ при капельной течи жидкой среды и при различной скорости истечения газообразной среды проводилось на УУИС, описание которого приведено в п. 7.4 Главы 7. Поэтому здесь только отметим, что для исследований использовался макет объемного статического оборудования МЗ с имитатором IV (п. 2.5.2 Глава 2), которым моделировалась ситуация истечения сред через стенку емкостного оборудования. Размеры несплошностей задавались разными жиклерами, которые имели диаметры номиналом: 0,45; 0,75; 0,85; 0,95; 1,02; 1,35; 1,5 и 6,0 мм. Скорость истечения среды через каждый жиклер задавалась перепадом давления между ресивером компрессора и комнатой с атмосферным давлением, в которую происходил выход испытательной среды. При исследованиях задавались следующие величины перепада давления: 0,015; 0,03; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 и 0,8 МПа. В качестве испытательной среды использовались вода и осушенный воздух комнатной температуры. Перепад давления контролировался по стрелочному манометру компрессора. АЭ регистрировалась системой РСІ-2 состав и условия записи приведены в п. 4.2 Главы 4.

Регистрация АЭ при истечении жидкости через несплошность днища проводилась при промышленном гидравлическом испытании резервуара на прочность и плотность в соответствии с требованиями [10, 216], а именно наливом воды и создания в нем испытательного давления равного 0,1 МПа с выдержкой в течение 5 минут. Резервуар имел диаметр 2,5 м, высоту 5 м и был смонтирован на бетонной плите, установленной на фундаментных блоках, позволяющих осмотр плиты, но не днища резервуара, которое не доступно для контроля. Снаружи резервуар окрашен и не имел тепловой изоляции. Поэтому без вывода из эксплуатации путем внешнего осмотра удалось установить, что на стенках и уторном шве резервуара герметичность не нарушена и течь может быть только

в его днище. Внутри резервуар имел гуммированный слой представляющий собой резинозащитный состав толщиной около 8 мм.

АЭ регистрировалась с резервуара регистрировалась системой РАС Samos 24 состав и условия записи которой приведены в п. 4.2 Главы 4. Преобразователи АЭ устанавливались на стенку резервуара вблизи уторного шва в один ряд по периметру. Расстояние между преобразователями (L) выбиралось с учётом рекомендаций [10, 11], а именно:

$$L_{зон} > L = \frac{P}{z}, \quad (4.1)$$

здесь: P – периметр резервуара, z – количество преобразователей АЭ, $L_{зон}$ – радиус зоны уверенного приёма АЭ для используемых преобразователей, удовлетворяющей следующему условию:

$$L_{зон} = \max(L_i) = ИФС + ДМП, \text{ при } (a_{peak\ i} - a_n) \geq 0, \quad (4.2)$$

здесь: $a_{peak\ i}$ – пиковая амплитуда сигнала от имитатора в i -том измерении с расстоянием до преобразователя L_i , где $i = 1, 2, 3 \dots$; a_n – средний уровень окружающего шума (фона), при отсутствии действия искомого источника АЭ; ИФС – интервал формирования события; ДМП – допуск на максимальный пробег; $(a_{peak\ i} - a_n) \geq 0$ – условие регистрации сигнала имитатора заданной амплитуды с расстояния L_i с учетом затухания волны в материале объекта контроля. В результате настроечных работ с применением имитатора в виде шуршания карандашом Су Нельсона было установлено, что условиям (2.31) и (2.32) удовлетворяет схема из 6 преобразователей АЭ (п. 6.3 Глава 6). Оценка уровня окружающего шума и его запись проводилась до начала гидравлического испытания.

4.1.5 Акустическая эмиссия при течении жидкой среды со срывом вихрей

Сигналы АЭ, использованные для апробации предложенного метода в направлении идентификации различных режимов течения жидкости в замкнутом объеме (п.6.4 Главы 6), получали при экспериментальных исследованиях с использованием универсальной роторной установки безреагентной обработки жидких сред (рисунок 4.7) и ее уменьшенной копии (рисунок 4.8), которые были собраны в Тольяттинском государственном университете. Роторная установка предназначена для отработки режимов работы для промышленных роторно-пульсационных аппаратов обеззараживания смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) аналогичного типа.

Универсальная роторная установка представляет собой испытательный стенд включающий: асинхронный двигатель мощностью 5,5 кВт; рабочую камеру объёмом 1,65

дм³; диск с активаторами гидродинамических процессов; средства контроля и управления. Последние позволяют: регулировать частоту вращения диска с активаторами в диапазоне $0 \div 4000 \pm 5\%$ об/мин; подачу жидкой среды с точностью 0,1 л/час и измерение: температуры среды, давление в системе подачи жидкости и мощности, потребляемой двигателем. Акустическое излучение регистрировалось в звуковом и ультразвуковом диапазонах средствами, не входящими в универсальный стенд.

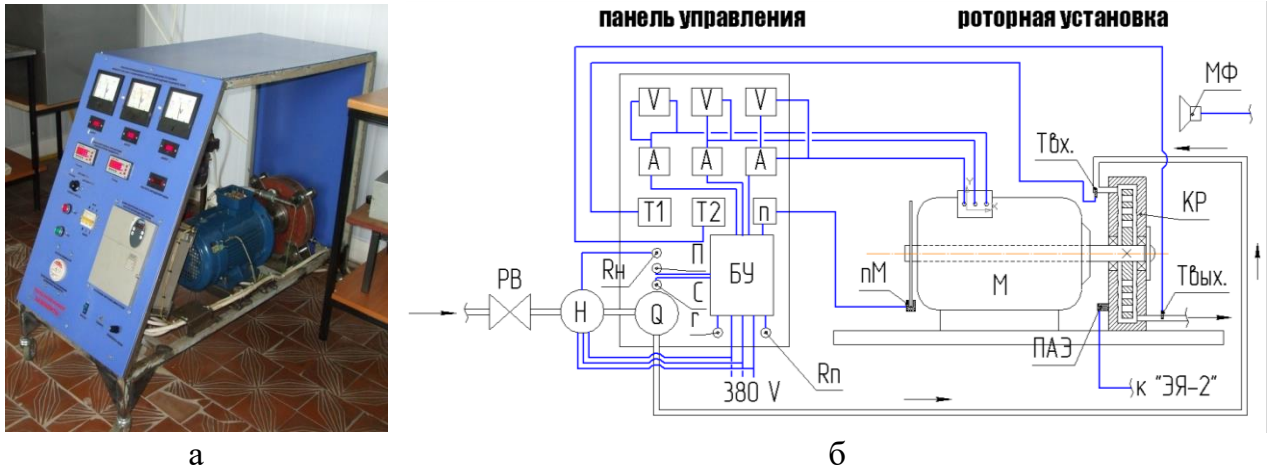


Рисунок 4.7 – Общий вид без боковых панелей (а) и принципиальная схема (б) универсальной роторной установки и схема акустических измерений.

Общая схема испытательного стенда и средства контроля и управления им показаны на рисунке 4.7б, где: КР – камера рабочая; М – двигатель электрический асинхронный (5АИ100L2У3 ООО «Элком», Россия); БУ – блок управления и контроля частоты вращения двигателя (Altivar 31 Telemecanique «Schneider Electric», Франция); пМ, п и Rп – датчик, указатель и регулятор числа оборотов вала электродвигателя соответственно (внешний счетчик импульсов-тахометр СИ-10 ООО «Овен-Пром», Россия); г – реверс электрического двигателя; V и А – соответственно вольтметр и амперметр по каждой фазе питания электродвигателя (соответственно М42300 400В «Ruichi», Россия-Китай и ЩП00П ОАО «Электроприбор», Россия); Н – трехскоростной электронасос (UPS 25-40 96281375 «Grundfos», Сербия); РВ – вентиль регулирующий; Q – расходомер (СИ-10 ООО «Овен-Пром», Россия); Rн – выключатель электронасоса; Твх. и Т1 (Твых. и Т2) – датчики и указатели температуры жидкости на входе (выходе) соответственно (термопары типа К с цифровым измерителем-ПИД регулятором УМКТ-1-ПИД ООО «ФЭА», Россия); П и С – кнопка пуска и остановки установки соответственно; ПАЗ – преобразователь акустической эмиссии; МФ – микрофон; 380V – кабель подачи электропитания установки.

Уменьшенная копия универсальной роторной установки (рисунок 4.8) была изготовлена для возможности визуального наблюдения и изучения режимов течения жидкости в замкнутом объеме роторной установки при различных условиях воздействия (скорости вращения активатора, скорости потока жидкости через камеру, температуры рабочей среды и различной формы активаторов). С этой целью уменьшенная копия имела прозрачную рабочую камеру (2), изготовленную из орг. стекла в масштабе 1:2,5. Привод активатора представлял собой коллекторный электродвигатель типа УЛ-062-УХЛ-4 (1) частота вращения которого задавалась лабораторным автотрансформатором (9) – ЛАТР TDGC2-2К ГК «Ресанта», Россия-Китай и отслеживалась по (7) - тахогенератор АМЕ, Китай. Скорость потока жидкости через камеру регулировалась насосом (5).

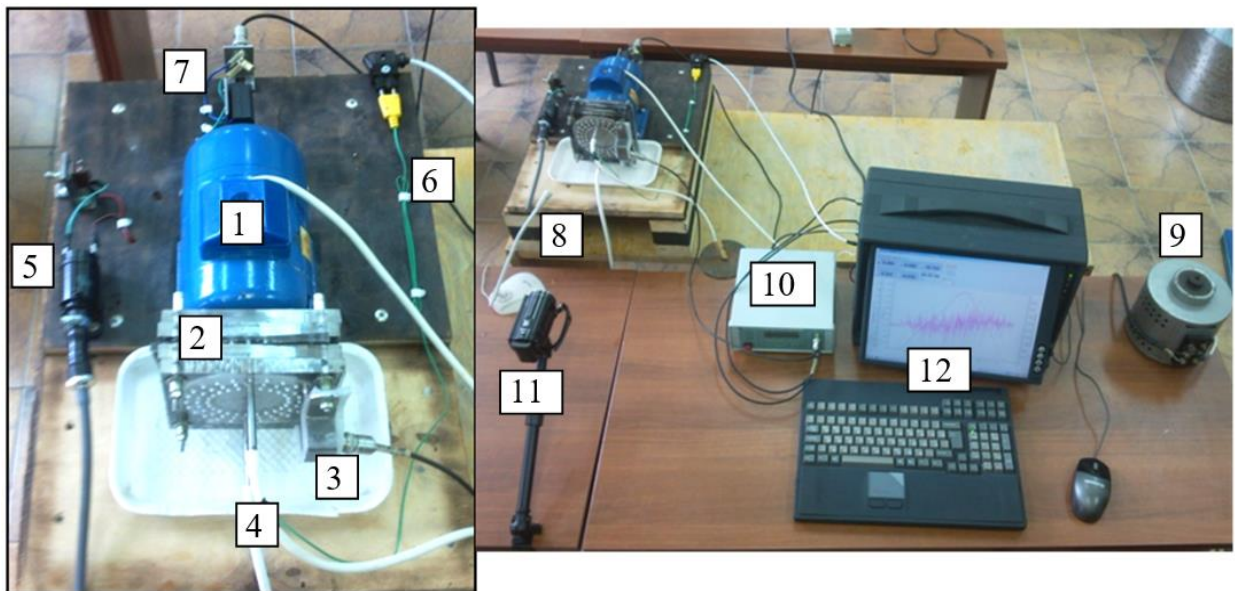


Рисунок 4.8 – Внешний вид уменьшенной копии универсальной роторной установки с прозрачной рабочей камерой, где: 1 – электродвигатель, 2 – рабочая камера, 3 – ПАЭ, 4 – трубки подвода/отвода жидкости, насос, 6 – термопара, 7 – тахогенератор, 8 – микрофон, 9 – трансформатор, 10 – предварительный усилитель АЭ, 11 – видеочамера, 12 – АЭ система «ЭЯ-2».

Температура жидкости в камере измерялась термопарой типа К (6). Исследования особенности течения жидкости, а также образования и срыва вихрей проводились на макете роторной установки двумя видеочамерами (11) с разным полем наблюдения и скоростью записи. Для съемки всей рабочей зоны использовалась цифровая камера Sony HDR-CX 110E с оптикой Vario-Tessar (Carl Zeiss, Германия) обеспечивающая максимальное оптическое увеличение $\times 25$, разрешение 2048×1536 px и скорость записи до 60 кадров в секунду (fps). Съемка локальной области рабочей камеры в зоне максимальной линейной скорости диска с активаторами проводилась с помощью

высокоскоростной цифровой видеокамеры FASTCAM SA3 120K-M2 (Photron Limited, Англия-США) с оптической системой Zoom 6000 (Navitar, США). При этом поле наблюдения составляло 8×8 мм (512×512 px), а скорость записи 6000 fps, что было достаточно для наблюдения процессов вихреобразования в жидкости.

Описание средств и условий акустических измерений, обозначенных буквенно «МФ», «ПАЭ» и «ЭЯ-2» на рисунке 4.7 и поз. (3), (8), (10) и (12) на рисунке 4.8, приведены в п. 4.2 Главы 4.

4.2. Средства акустических исследований

4.2.1. Состав аппаратуры, условия записи и обработки акустической эмиссии

Здесь при описании условий записи и обработки АЭ приняты следующие обозначения: ПАЭ – пьезопреобразователь АЭ; ПУ – предварительный усилитель; П, БП или К – режим записи АЭ, соответственно пороговый, беспороговый или кадровый; Δf – диапазоне частот; k_y – коэффициент усиления (дБ); f_d – частота дискретизации; D и m – соответственно, динамический диапазон и разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП), где: $D = 6 \cdot m + 2$, где: m – битах; r_A – разрешающая способность по амплитуде ($r_A = D/m$, m – в ед. АЦП); t_{rec} – длительность кадра записи при анализе АЭ в отсчетах (времени); r_f – разрешение по частоте (формула (2,29)). Анализ данных везде проводился с помощью АЭ системы ЭО ИСМ-АЭ технические характеристики и описание которой приведены в таблице 4.4 и п. 7.1 Главы 7 соответственно.

В п. 4.1.1 Главы 4 с макета МЗ «УУИС» (п.7.4 Главы 7) регистрация модельных сигналов второго и третьего типа и АЭ при течи различных сред проводилась ПАЭ «П111-(0,05-0,8)» (г. Ростов-на-Дону) с ПУ «MSAE-FA010» (ООО «Микросенсорс АЭ», г.Саров) и записывались системой «РАС РСІ-2» (таблица 4.4) при следующих условиях: П+БП; $k_y = 60$ дБ; $\Delta f = 20 \div 1000$ кГц; $f_d = 2$ МГц; $D = 110$ дБ; $m = 18$ бит; $r_A = 0,0008$ дБ/ед. АЦП; $t_{rec} = 8192$ отсчета (4,096 мс); $r_f = 0,12$ кГц.

В п. 4.1.2 Главы 4 при испытаниях на машинах трения «ЧМТ-1» и «УМИТУ» сигналы АЭ регистрировались ПАЭ «AE-900S-WB» (NF Electronics, Япония) с ПУ собственного изготовления и записывалась системой «ЭЯ-2» (таблица 4.4) при следующих условиях: К; $k_y = 40$ дБ; $\Delta f = 50 \div 1000$ кГц; $f_d = 6,25$ МГц; $D = 74$ дБ; $m = 12$ бит; $r_A = 0,036$ дБ/ед. АЦП; $t_{rec} = 8192$ отсчета (1,311 мс); $r_f = 0,38$ кГц. При испытаниях на машине трения «TRB-50N» стали 20 и 45 АЭ регистрировалась ПАЭ «MSAE-1300WB» с предварительным усилителем «MSAE-FA010» (ООО «Микросенсорс АЭ», г.Саров), а стали Р6М5 – ПАЭ «Micro-F30» с усилителем «2/4/6» (Physical Acoustics Corporation,

США). В обоих случаях оцифровка и запись АЭ проводилась АЭ системой «РАС РСІ-2» (таблица 4.4) при следующих условиях: П+К+БП; $k_y = 40$ дБ; $\Delta f = 50 \div 1000$ кГц; $f_d = 2, 3$ или 5 МГц; $D = 110$ дБ; $m = 18$ бит; $r_A = 0,0008$ дБ/1ед. АЦП; $t_{rec} = 8192$ отсчета (4,096; 2,730 и 1,638 мс); $r_f = 0,12; 0,18$ и $0,31$ кГц.

В п. 4.1.3 Главы 4 при лабораторных испытаниях на рост усталостных трещин сварных образцов АЭ регистрировалась ПАЭ «MSAE-1300WB» с ПУ «MSAE-FA010» (ООО «Микросенсорс АЭ», г.Саров) и записывалась системой «РАС РСІ-2» (таблица 4.4) при следующих условиях: П+БП; $k_y = 60$ дБ; $\Delta f = 150 \div 1000$ кГц; $f_d = 2$ МГц; $D = 110$ дБ; $m = 18$ бит; $r_A = 0,0008$ дБ/1ед. АЦП; $t_{rec} = 4096$ отсчета (2,048 мс); $r_f = 0,24$ кГц. Учитывая, что длительность цикла составляет 100 мс, а длительность кадра 2,048 мс, то получаем, что каждый цикл делился на 48 кадров записи АЭ. При лабораторных испытаниях на рост усталостных трещин компактных образцов АЭ снималась и записывалась параллельно двумя АЭ системами. Первая, «РАС РСІ-2» (таблица 4.4) с «ПАЭ П111-(0,05-0,8)» (г.Ростов-на-Дону) и ПУ «2/4/6» (Physical Acoustics Corporation, США) регистрировала АЭ с одной стороны образца при следующих условиях: П+К+БП; $k_y = 26$ дБ; $\Delta f = 20 \div 1000$ кГц; $f_d = 2$ МГц; $D = 110$ дБ; $m = 18$ бит; $r_A = 0,0008$ дБ/1ед. АЦП; $t_{rec} = 8192$ отсчета (4,096 мс); $r_f = 0,12$ кГц. Вторая, «А-Line 32D» (таблица 4.4) с «ПАЭ П111-(0,05-0,8)» (г.Ростов-на-Дону) и ПУ «ПАЭФ-014» (ООО Интерюнис-ИТ, Москва) регистрировала АЭ с обратной стороны образца при следующих условиях: П+К; $k_y = 26$ дБ; $\Delta f = 30 \div 500$ кГц; $f_d = 2$ МГц; $D = 98$ дБ; $m = 16$ бит; $r_A = 0,003$ дБ/1ед. АЦП; $t_{rec} = 8192$ отсчета (4,096 мс); $r_f = 0,12$ кГц. ПАЭ приклеивались к образцу с помощью эпоксидной смолы. При промышленном контроле поврежденности цапф сушильных цилиндров картоноделательных машин использовалась АЭ система «А-Line 32D» в указанной выше аппаратной комплектации с теми же условиями записи и обработки АЭ. ПАЭ крепились к объекту контроля с помощью магнитных держателей через консистентную акустическую среду в местах, показанных на рисунке 4.5.

В 4.1.4 Главы 3 с макета МЗ «УУИС» (п.7.4 Главы 7) регистрация АЭ сопровождающей истечение жидкой и газообразной сред проводилась ПАЭ «П111-(0,05-0,8)» (г. Ростов-на-Дону) с ПУ «2/4/6» (Physical Acoustics Corporation, США) и записывались системой «РАС РСІ-2» (таблица 4.4) при следующих условиях: П+БП; $k_y = 60$ дБ; $\Delta f = 20 \div 1000$ кГц; $f_d = 2$ МГц; $D = 110$ дБ; $m = 18$ бит; $r_A = 0,0008$ дБ/1ед. АЦП; $t_{rec} = 8192$ отсчета (4,096 мс); $r_f = 0,12$ кГц. АЭ сигналы при гидравлических испытаниях резервуара хранения щелочи регистрировались ПАЭ «R15I-AST» (Physical Acoustics Corporation, США) с встроенными ПУ и записывались системой «РАС Samos 24»

(таблица 4.4) при следующих условиях: П+К; $k_y = 40$ дБ; $\Delta f = 20 \div 400$ кГц; $f_d = 1$ МГц; $D = 98$ дБ; $m = 16$ бит; $r_A = 0,003$ дБ/1ед. АЦП; $t_{rec} = 1024$ отсчета (1,024 мс); $r_f = 0,48$ кГц. Координаты источников АЭ определялись модифицированным методом триангуляции, описание которого приведено в п. 4.3.3 Главы 4. Порог при записи составлял 23 дБ, что было достаточно чтобы задать запись кадров АЭ через «мёртвое время» аппаратуры, которое менялось в зависимости от загруженности АЭ системы, но было не менее 19 мс. Целью такой записи было устранить зависимость записи АЭ от порога и перейти к статистическому ее наблюдению, когда кадры регистрировались непрерывным образом через «мертвое время» аппаратуры, т.о. вероятность записи АЭ сигналов от течи определялась только временем наблюдения (общим количеством кадров записи АЭ).

В п. 4.1.5 Главы 4 запись всех акустических сигналов (звукового и ультразвукового диапазонов) при исследовании режима работы роторных установок проводилось АЭ системой «ЭЯ-2» (Таблица 4.4). Звуковые сигналы регистрировались микрофоном «MiC-01A» (Genius, Китай) и записывались интегрированной в «ЭЯ-2» звуковой платой «SB5.1» (Creative Technology Limited, Сингапур) при следующих условиях: БП; $k_y = 0$ дБ; $\Delta f = 0,1$ Гц $\div 11$ кГц; $f_d = 48$ кГц; $D = 98$ дБ; $m = 16$ бит; $r_A = 0,003$ дБ/1ед. АЦП. Запись звуковых сигналов проводилась с учетом правил измерения шума от промышленных установок в помещении: точка измерения находилась со стороны рабочей камеры на высоте 1 м от уровня пола в 3 м от ближайшей стены помещения, в 1 м от работающего стенда и более чем на 0,5 м от оператора, проводящего измерения. Ультразвуковые (АЭ) сигналы регистрировались непосредственно с рабочих камер роторных установок (рисунки 4.7 и 4.8) ПАЭ «MSAE-G» с ПУ «MSAE-FA010» (ООО «Микросенсорс АЭ», г.Саров) и записывались платой АЦП «ЭЯ-2» (Таблица 4.4) при следующих условиях: К; $k_y = 46$ дБ; $\Delta f = 20 \div 1500$ кГц; $f_d = 6,25$ МГц; $D = 74$ дБ; $m = 12$ бит; $r_A = 0,036$ дБ/1ед. АЦП; $t_{rec} = 8192$ отсчета (1,311 мс); $r_f = 0,38$ кГц. Параллельно АЭ системой по параметрическим каналам регистрировалась частота вращения активатора и температура жидкости в камере.

4.2.2. Основные технические характеристики акустико-эмиссионных систем

Таблица 4.4

Параметр	АЭ система				
	РАС PCI-2	РАС Samos 24	A-Line 32D	ЭЯ-2	ЭО ИСМ-АЭ
Тип системы	И	П	П	И	И
Производитель	РАС	РАС	IU	ТГУ	ТГУ
Тип АЦП	PCI-2	PCI-8HF	PCI-8E	РШ Ла-Н20-12PCI	X3-10M PCI Express

Параметр	АЭ система				
	РАС PCI-2	РАС Samos 24	A-Line 32D	ЭЯ-2	ЭО ИСМ-АЭ
Количество плат АЦП в БОИ, шт	1	3	2	1	1
Количество каналов записи АЭ, шт	2	24	16	2	8
Разрядность АЦП, бит	18	16	16	12	16
Усилитель на АЦП, дБ	0/ 6	0/ 6/ 12	0	0/ 6/ 14/ 20	0/ 6/ 14/ 20
Уровень собственного шума, дБ	< 17	< 20	< 20	< 20	< 20
Динамический диапазон, дБ	> 85	> 72	> 84	> 73	> 75
Рабочий диапазон частот, МГц	≤ 3,0	≤ 0,4	≤ 0,5	≤ 1,2	≤ 5,0
Частота дискретизации АЦП, МГц	≤ 40,0	≤ 3,0	≤ 2,0	≤ 50,0	≤ 10,0
Входное напряжение, В	± 28*	± 28*	± 24*	≤ ± 2	≤ ± 2
Входное сопротивление, Ом	50/1000	50	50	50	50/1000
Стрим-запись АЭ	Есть	Есть	Нет	Нет	Есть
Кадровая запись АЭ	Есть**	Есть**	Есть**	Есть**	Есть
Максимальная длина кадра записи АЭ, Кслов	15	4	4	128	128
Количество параметрических входов, шт	2	3	4	4***	4
Тактовая частота процессора БОИ, ГГц	3,3	2,0	3,3	1,8	3,0
Объем оперативной памяти БОИ, ГБ	4	2	4	1	8
Объем памяти БОИ для хранения АЭ данных, ГБ	500	250	300	250	1000
Программное обеспечение (ПО) БОИ	AEwin for PCI v.E1.56	AEwin for Samos v.E2.00	A-Line 32D v.5.04	AE-Recorder v.E4.00 AE-0 v.1.0.4.0	ЭО ПК ИСМ-АЭ
Разработчик ПО БОИ	РАС	РАС	IU	ТГУ	ТГУ

* - По напряжению питания предварительных усилителей; ** - Кадровая запись АЭ по превышению порога амплитудной дискриминации; *** - Отдельная плата АЦП. В таблице приняты следующие сокращения: РАС - Physical Acoustics Corporation / MISTRAS Holdings Company, США; IU – ООО «ИнтерЮнис-ИТ», Москва; ТГУ – Тольяттинский государственный университет; РШ – ЗАО «Руднев-Шиляев», Москва; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; И – исследовательская; П – промышленная; БОИ – блок обработки информации; ЭО – экспериментальный образец; ПО и ПК – соответственно программное обеспечение и модульный программный комплекс.

4.2.3. Средства калибровки преобразователей акустической эмиссии

Получение амплитудно-частотных характеристик и проверка работоспособности использованных в исследованиях ПАЭ проводились на генераторе калиброванных

акустических импульсов «MSAE-UCA01» [217] (ООО «Микросенсорс АЭ», г.Саров) по методикам [29, 151]. Запись и анализ откликов ПАЭ на калиброванное воздействие генератора выполнялось с помощью обозначенных АЭ систем и параллельно подключенным цифровым осциллографом «Wave Runner 44Xi-A» (LeCroy, США).

4.3. Методы и алгоритмы обработки акустико-эмиссионных данных

4.3.1. Алгоритмы шумопонижения и шумоподавления

4.3.1.1. Алгоритм спектрального вычитания шума

Процедура спектрального вычитания шума (Spectral Noise Reduction) в кадрах записи АЭ выполнялась следующим образом. Для каждого кадра записи АЭ $a(t)$ получали амплитудный $S(f)$ и фазовые $\omega(f)$ спектры сигнала ($S_y(f)$ и $\omega_y(f)$) и шума ($S_n(f)$ и $\omega_n(f)$) [145]:

$$A_f = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot \exp\left(-j \cdot \frac{2\pi}{n} \cdot f \cdot i\right), \quad (4.3)$$

$$S(f) = \{|A_f|/n\}; \quad \omega(f) = \{\arg(A_f)\}, \quad (4.4)$$

здесь: a_i – амплитуда сигнала в дискретной временной точке i кадра $a(t)$, где $i \in 0 \dots n-1$, а n – длина выборки или общее число значений сигнала в рассматриваемом t -периоде кадра записи АЭ; j – мнимая единица; A_f – комплексная амплитуда составляющих исходного сигнала соответствующей частоты $f \in 0 \dots n-1$.

Принимая, что шум аддитивен и квазистационарен, и что $S(f)$ несет основную информацию по сравнению с $\omega(f)$ выполняли спектральное вычитание по следующему правилу [146]:

$$S_x(f) = \left[|S_y(f)|^\beta - \alpha \cdot |S_n(f)|^\beta \right]^{1/\beta}, \quad (4.5)$$

Здесь, соответственно: $S_y(f)$ и $S_x(f)$ – исходный и отфильтрованный амплитудный спектр сигнала; $S_n(f)$ – амплитудный спектр шума; α и β – настроечные параметры, позволяющие задать оптимальные условия для вычитания шума путем изменения масштаба шума (α) и величин спектральных составляющих (β). В нашей реализации $\beta = 1$, а чтобы не допустить $S_x(f) < 0$ с (4.5) использовалось следующее дополнительное правило:

$$S_x(f) = \max\{S_y(f) - \alpha \cdot S_n(f), \lambda\}, \quad (4.6)$$

здесь λ – заданный минимальный базовый уровень, который в нашей реализации принимался $\lambda = 0$.

Учитывая, что коэффициенты $S_y(f)$ и $S_n(f)$ являются статистически случайными переменными, то применение данного алгоритма приводит к неравномерному подавлению шума на разных частотах. В результате $S_x(f)$ содержит артефакты в виде

частотно-ограниченных амплитудных всплесков. Для их подавления используется следующая процедура сглаживания спектра [146]:

$$\bar{S}_x(f) = \bar{S}_x(f-1) + \xi \cdot (S_x(f) - \bar{S}_x(f-1)), \quad (4.7)$$

где: \bar{S}_x – сглаженная спектральная составляющая соответственно текущая (f) и предшествующая ($f-1$); ξ – коэффициент сглаживания.

Далее определяется комплексная амплитуда составляющих отфильтрованного сигнала как:

$$\hat{A}_f = \bar{S}_x(f) \cdot \exp(j\omega_y(f)), \quad (4.8)$$

Из формул (4.5) – (4.7) видно, что при спектральном вычитании фазовая компонента исходного сигнала $\omega_y(f)$ не подвергается изменениям, поэтому в (4.8) она подставляется в исходном виде. Далее получаем $\hat{a}(t)$ – восстановленный кадр записи АЭ с подавленным шумом путем обратного преобразования Фурье:

$$\hat{a}_i = \frac{1}{n} \sum_{f=0}^{n-1} \hat{A}_f \cdot \exp\left(j \cdot \frac{2\pi}{n} \cdot f \cdot i\right). \quad (4.9)$$

4.3.1.2. Алгоритм частотной коррекции

Процедура спектральной частотной коррекции, или оконный фильтр (FFT-filter) выполнялась аналогично спектральному вычитанию по формулам (4.3) – (4.9) с тем отличием, что вместо $S_n(f)$ используется некоторая заданная функция коррекции $K_n(f)$, представляющая собой набор коэффициентов передачи фильтра по каждой частоте f (коэффициенты корректировки), а сама процедура шумопонижения выполняется не вычитанием по формуле (4.5), а заменяется следующим произведением:

$$S_x(f) = S_y(f) \cdot \alpha \cdot K_n(f). \quad (4.10)$$

Соответственно при $K_n(f) = 1$ значение $S_y(f)$ не изменяется, при $K_n(f) < 1$ кратно уменьшается (ослабляется), а при $K_n(f) > 1$ – усиливается. При этом следует соблюдать следующее правило: коэффициенты $K_n(f)$ должны быть выбраны таким образом, чтобы при корректировке избежать превышение динамического диапазона сигнала, что, как и в формуле (3.15), обеспечивается масштабным коэффициентом α .

4.3.2. Алгоритмы классификации и кластеризации акустико-эмиссионных данных

4.3.2.1. Алгоритм кластеризации R-квадрат

Алгоритм предложен в работе [199], а также подробно описан в [25] и реализовывался следующим образом. На первом этапе по отфильтрованным кадрам АЭ $\hat{a}(t)$ рассчитывались кривые спектральной плотности мощности (СПМ) $G(f)$. Далее по формулам (2.15) – (2.16), но в пределах анализируемого диапазона частот Δf получали

нормированные функции СПМ $G^*(f)$. Затем, после оценки дисперсии нормированные функции СПМ $G^*(f)$ сравнивались с применением коэффициента достоверности аппроксимации (или R -квадрат) по следующим выражениям:

$$\bar{S}_r^2 = \frac{\sum_1^n (G_0^*(f) - G_q^*(f))^2}{n-2}, \quad (4.11)$$

$$\bar{S}_t^2 = \frac{\sum_1^n G^*(f)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_1^n G^*(f) \right)^2}{n-1}, \quad (4.12)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\bar{S}_r^2}{\bar{S}_t^2}. \quad (4.13)$$

Здесь: $G_0^*(f)$ и $G_q^*(f)$ – соответственно функция СПМ, взятая за эталонную и сравнивая с ней; \bar{S}_r^2 – остаточная дисперсия; \bar{S}_t^2 – общая дисперсия; n – объем частотной выборки $G_0^*(f)$ и $G_q^*(f)$.

Значения \bar{S}_t^2 по формуле (4.12) рассчитывается при $G^*(f) = G_0^*(f)$ и при $G^*(f) = G_q^*(f)$, поэтому при каждом сравнении получается два значения R -квадрат, характеризующие достоверность прямой и обратной аппроксимации. Из формулы (4.13) видно, что при идеальном совпадении сравниваемых СПМ ($\bar{S}_r^2/\bar{S}_t^2 = 0$) R -квадрат будет равен единице (100 %), а если нет корреляции между сравниваемыми СПМ ($\bar{S}_r^2/\bar{S}_t^2 = 1$) R -квадрат будет равен нулю. Однако реальные значения R -квадрат лежат между этими крайними значениями.

4.3.2.2. Алгоритм кластеризации k -средних

Алгоритм k -средних заключается в итерационной минимизации суммарного квадратичного отклонения объектов выборки от центров кластеров, что условно можно записать как [197, 218]:

$$V = \sum_{l=1}^k \sum_{x_m \in C_l} \|x_m - c_l\|^2, \quad (4.14)$$

здесь: 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 ($m = 1, 2, 3 \dots \infty$); $\|x_m - c_l\|^2$ – мера сравнения, выбранная для оценки расстояния между объектом выборки x_m и соответствующим центроидом c_l в пространстве m – признаков.

Кратко процедура выполняется следующим образом. В начале выбирается (задается) произвольное количество k . Затем каждый объект x_m приписывается к ближайшему

центроиду c_l . После этого все центроиды пересчитываются для получения новых координат их положения удовлетворяющих условиям минимума расстояния между объектами выборки до центров кластеров и максимума расстояния между центрами кластеров. Далее цикл отнесения x_m к ближайшему c_l многократно повторяется и останавливается, когда центроиды перестают смещаться (не изменяются координаты их положений). Более подробное описание реализации алгоритма приведено в [218].

В исследованиях вариантов совмещения алгоритмов фильтрации и кластеризации в п. 5.2 Главы 5 в качестве меры сравнения $\|x_m - c_l\|^2$ использовалось расстояние Махаланобиса, которое может быть записано как [218]:

$$\|x_m - c_l\|^2 = \sum_{i=1}^t \left(\frac{a_i - b_i}{\sigma_i} \right)^2, \quad (4.15)$$

здесь: $\{a_1, a_2, \dots, a_t\}$ и $\{b_1, b_2, \dots, b_t\}$ – наборы параметров кластеризации сравниваемых объектов A и B соответственно, а $\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_t\}$ – стандартные отклонения значений a_i и b_i , рассчитанные по всему набору данных. Данный выбор обусловлен тем, что при исследованиях требовалось оценить дистанцию между объектом выборки и распределением. В п. 5.3 Главы 5 требовалось на общем пространстве заданных параметров оценить удалённость друг от друга двух распределений (эталонного (опорного) и экспериментального), поэтому при оценке работоспособности критериев классификации источников АЭ по классу их опасности разработанных для II уровня предлагаемого метода в качестве меры сравнения $\|x_m - c_l\|^2$ использовалось расстояние Кульбака-Лейблера (KL). Расстояние KL представляет собой симметричный вариант дивергенции Кульбака-Лейблера (D_{KL}) и определяется как:

$$D_{KL} = \sum_{i=1}^k (x_i - c_i) \cdot \log \left(\frac{x_i}{c_i} \right), \quad (4.16)$$

здесь: k – количество априорно заданных кластеров; c_l – средний арифметический центроид всех точек кластера C_l (центр масс векторов); x_i – объект выборки в координатах сравниваемых признаков.

4.3.2.3. Модифицированный алгоритм классификации по скорости изменения RMS

Прообразом данного алгоритма является способ [194] в котором обнаружение АЭ событий проводится по положению характеристического вектора $r(\alpha, \beta)$, где α координата «скорость изменения интенсивности АЭ», а β – «скорость изменения дисперсии интенсивности АЭ». Модификация обозначенного способа состояла во внесении двух изменений.

Первое, заключалось в замене неопisanного в первоисточнике параметра «интенсивность АЭ» на параметр «среднеквадратичное значение сигнала» (RMS). Поскольку в работах [195, А6, А7, А22 и др.] показано, что среднеквадратичное значение сигнала АЭ (RMS) является чувствительным к смене механизмов трения и изнашивания параметром, одновременно описывающим амплитудно-волновую форму и активность АЭ, т.е. среднюю мощность и частоту АЭ. Поэтому величина (уровень) RMS может быть маркером смены механизма повреждения узла трения. Однако только величины RMS для этой цели недостаточно, поскольку она не отражает характер трения и изнашивания. В работах [А8, А23] было отмечено, что скорость изменения RMS $\langle \dot{rms} \rangle$ и ее дисперсия σ^2_{rms} могут служить идентификационными признаками механизма изнашивания. Таким образом, вторая модификация заключается в переходе к классификации по параметрам $(\langle \dot{rms} \rangle, \sigma^2_{rms})$, которые рассчитывались по следующим формулам:

$$\langle \dot{rms}_q \rangle = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^Z (\hat{a}_{(q+j)rms} - \hat{a}_{(q+j-1)rms}), \quad (4.17)$$

$$\sigma^2_{rmsq} = \frac{1}{Z-1} \left(\sum_{j=1}^Z \Delta \hat{a}_{(q+j)rms} - \langle \dot{rms}_q \rangle \right)^2, \quad (4.18)$$

где: T - время осреднения для получения одной пары сравнения $(\langle \dot{rms} \rangle, \sigma^2_{rms})$; Z - количество последовательных отфильтрованных кадров АЭ $\hat{a}(t)$, используемых для осреднения; q - порядковый номер расчетного кадра. Разделения и классификация объектов сравнения проводилась аналогично [194], но на поле в двойных логарифмических координатах $(\langle \dot{rms} \rangle, \sigma^2_{rms})$.

4.3.3. Модифицированный алгоритм локации источников акустической эмиссии

Алгоритм предложен для случаев, когда невозможно установить наличие и временное положение сигналов в записи АЭ [А14, А37]. Такая ситуация возникает, когда запись АЭ связана не со временем прихода сигнала, как при пороговом детектировании АЭ, а с порядком регистрации кадра записи АЭ, как при беспороговом детектировании АЭ, например, спектральными методами (п. 2.2. Глава 2).

В зависимости от формы антенной группы расстановки ПАЭ в основе алгоритма применяются стандартные виды локации на базе расчета разности времен прихода (РВП). В данной работе использовалась плоскостная локация с определением координат методом триангуляции, в котором для определения координат источника используется следующее выражение [6]:

$$\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 = C^2 \cdot \text{РВП}_i^2, \quad (4.19)$$

где: Δx и Δy – соответственно расстояние от i -того ПАЭ источника по оси ОХ и ОУ, L – расстояние между ПАЭ в антенной группе, C – скорость распространения АЭ волны в материале объекта контроля. Для возможности определения местоположения источника АЭ с помощью данного алгоритма при формировании антенной решетки должны выполняться условия (2.31) и (2.32).

Модификация (4.19) состояла во внесении двух изменений [А14, А37]. Первое, состоит в том, что РВП рассчитывается не для всех детектируемых сигналов АЭ (как при пороговой регистрации), а только для кадров записи АЭ, которые принадлежат одному из параметрических кластеров, имеющих связь с определенным АЭ источником. Принадлежность параметрических кластеров определенным АЭ источникам устанавливается на стадии дополнительных испытаний, например, по методам получения опорных данных (п. 2.5 Глава 2). Таким образом, каждое событие на локационной карте может быть окрашено в цвет, установленный для каждого типа шумоподобного источника АЭ (течь, трение и т.д.). Вторая модификация состоит в том, что время прихода сигнала устанавливается в пределах времени регистрации кадра записи АЭ плюс его длительность, а РВП находится между кадрами записями АЭ, принадлежащих одному кластеру, но зарегистрированных по разным каналам записи, что осуществляется следующим образом.

Известно [6], что каждый источник АЭ активируется случайно под действием внешних условий, которые провоцируют его развитие (давление, сила, температура и др.). Однако, если время его срабатывания попало в запись, то его положение по временной шкале записи АЭ по каждому каналу регистрации должно быть в пределах времени распространения сигнала, т.е. $ИФС+ДМП$, где: $ИФС$ – интервал формирования события, $ДМП$ – допуск на максимальный пробег. Поэтому выявление кластеров АЭ принадлежащих одному событию, но полученных по разным каналам основывается на сравнении временных функций их проявления в пределах записи АЭ. Для этого запись АЭ трансформируется в последовательность появления групп (кластеров) кадров в виде бинарных рядов (масок) с последующим их сравнением в пределах $ИФС+ДМП$. Процедура выполняется следующим образом.

На записи АЭ кадры в пределах своей длины t_{rec} и временной метки регистрации заменяются на присвоенный им номер группы (кластера). Причем участки заданной (рассматриваемой) группы заменяются на «1», а остальным присваивается значение «0». Бинарные ряды (маски) строятся на каждую группу (кластер) по каждому каналу (рисунок 4.5).

Подобие между бинарными рядами (масками), а также время задержки (τ_0) между ними определяется по значению и положению максимумов функций кросс-корреляции в пределах времени сравнения (*ИФС+ДМП*). В результате сравнения бинарных рядов (масок) группы кадров АЭ, зарегистрированных разными каналами, приводятся к одним номерам (одинаковым событиям) в соответствии с формой кривой СПМ и максимумами τ_0 . При этом возможно совпадение периодичности проявления двух и более следующих друг за другом групп (кластеров), что является признаком разбивки одного АЭ-события на несколько групп (кластеров). В этом случае несколько групп (кластеров) могут быть объединены и рассматриваться как одно событие, если не анализируется дисперсия волн или применяется дисперсионный алгоритм локации АЭ источников [186].

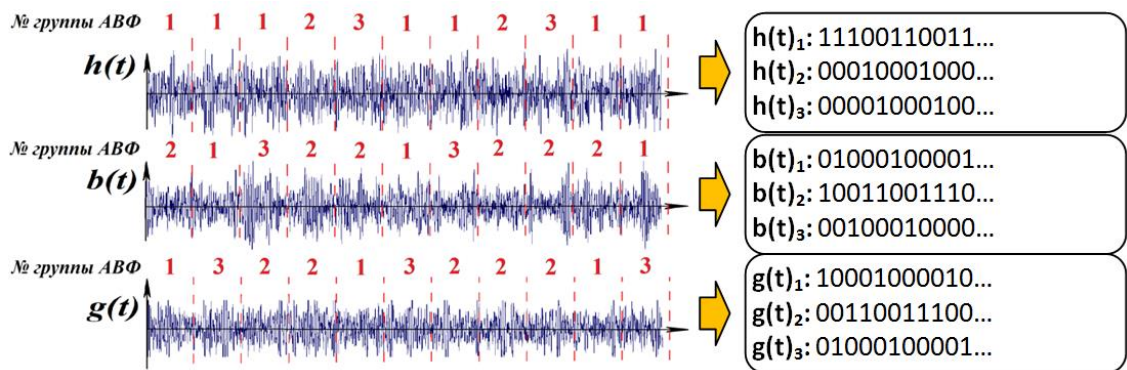


Рисунок 4.5 – Пример бинаризации записи АЭ зарегистрированных тремя каналами (h, b и g) при наличии 3-х групп (кластеров) кадров.

После установления принадлежности кадров записи АЭ всех каналов регистрации одному или нескольким источникам проводится кластерная фильтрация данных (удаление из рассмотрения кадров записи шума и не исследуемых в данный момент источников АЭ/процессов) и определение координат исследуемых источников. В простейшем случае для определения координат по кадрам АЭ рассчитывается РВП, для чего кадр приводится к импульсной форме путем его замены на импульсы длительностью равной длине кадра и амплитудой равной либо максимальной, либо средней амплитуде колебания в кадре (рисунок 4.6).

РВП получается, как разница начал отсчёта кадров (фреймов) или разница времени между максимальными амплитудами на кадрах (фреймах), принадлежащих одному событию. Более точное и более сложное определение РВП проводится путем расчета временного сдвига τ_0 по функции кросс-корреляции кадров АЭ входящих в локационную серию. Далее по известной РВП или τ_0 определение координат шумоподобного источника АЭ проводится по (4.19). Учитывая, что процедуры определения координат источников

АЭ по (4.19) известны [3, 6, 186 и др.] и не модифицируются, то их описание не приводится.

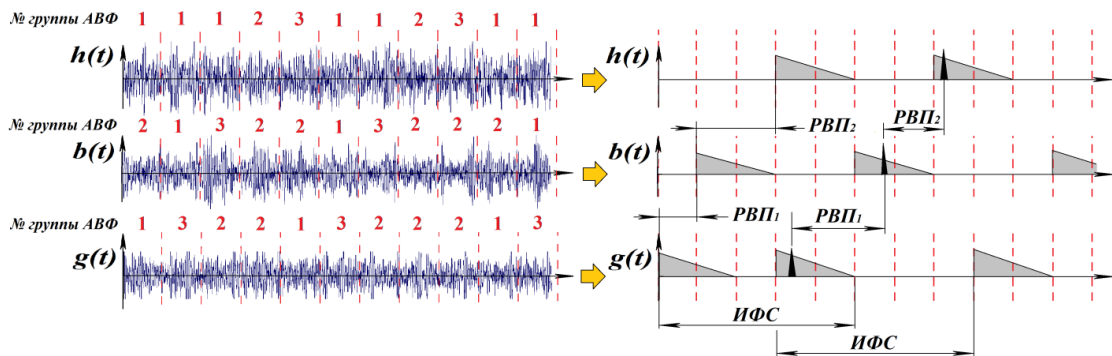


Рисунок 4.6 – Пример приведения записи АЭ зарегистрированных тремя каналами (h, b и g) из кадрового (фреймового) к импульсному виду.

4.3.4. Метод оценки вероятности обнаружения источников акустической эмиссии

Вероятность локализации мест расположения дефектов определяется совпадением реального местоположения дефекта на объекте контроля с данными локационной карты АЭ. Традиционно такие оценки проводятся через расчет погрешности определения времени прихода сигнала [3, 6, 41, 102, 219, 220 и др.]. Однако данные подходы разработаны для порогового способа обнаружения АЭ и не учитывают ошибки локации, возникающие из-за регистрации шума. Кроме этого из описания метода иерархического анализа шумоподобных сигналов АЭ (п. 2.4 Глава 2) и модифицированного алгоритма их локации (п. 4.3.3 Глава 4) видно, что при покадровом анализе АЭ неопределенность определения времени прихода сигнала стремиться к длине кадра записи АЭ. Поэтому, из-за неучёта обозначенных особенностей, сравнение эффективности порогового метода и предлагаемого метода анализа шумоподобной АЭ по погрешности определения времени прихода сигнала не будет являться корректным.

Известен способ определения погрешности локализации дефекта через среднеквадратичные отклонения расстояний между двумя точно известными координатами источника АЭ и показаниями локационной карты [221], который более подходит к обозначенной ситуации. Однако он не учитывает, во-первых, на практике результаты АЭ контроля подтверждают другими методами НК, которые имеют свою погрешность. Во-вторых, дефекты, распределенные по площади невозможно корректно привести к двум точно известным координатам. В-третьих, для шумоподобных источников АЭ, описываемых статистическими характеристиками, наиболее предпочтительнее использовать вероятностные оценки. В связи с этим, в настоящей работе при оценке эффективности порогового метода и предлагаемого метода

используется вероятность обнаружения местоположения дефекта, которая оценивается двумя параметрами [А6, А16, А42, А45].

Первый оценочный параметр – это вероятность обнаружения источника по количеству локационных событий в АЭ кластере, которая определяется как:

$$P_{лс} = P_{до}/P_{лс\sigma}, \quad (4.20)$$

где: $P_{до}$ – количество локационных событий, приходящихся на АЭ кластер совпадающий с местом расположения дефекта, $P_{лс\sigma}$ – общее количество АЭ событий на локационной карте элемента объекта контроля (в дефектной и др. областях).

Однако известно [10], что, если результаты АЭ контроля противоречат данным дополнительного НК, результаты последнего считаются приоритетными. Поэтому вероятность обнаружения дефекта при АЭ контроле обуславливается возможностью промаха в оценке координат источника АЭ, приводящего к пропуску дефекта по причине проведения дополнительного НК в области, не совпадающей с дефектной зоной. При этом наш опыт локализации плоскостных дефектов [222, 223, А15] и других авторов показывает, что при корректном выполнении всех требований подготовки к АЭ контролю по [10] область объекта контроля, ограниченная 90% сигналов локационного кластера, даже при наличии некоторой ошибки локации всегда частично или полностью включает в себя дефектную зону, поэтому применяется и второй оценочный параметр.

Второй оценочный параметр – вероятность обнаружения дефекта по площади АЭ события ($P_{АЭК}$), т.е. вероятность перекрытия по двум координатным осям дефектной зоны с областью контроля, назначенной по АЭ данным для перепроверки другим методом НК, который определяется как [А6, А16, А42, А45]:

$$P_S = P_X \cdot P_Y, \quad (4.21)$$

где: P_X и P_Y – вероятность перекрытия дефектной зоны размером $b \times d$ с областью дополнительного контроля размером $a_L \times a_H$ в пределах АЭ кластера возможной локализации события размером X_0 и Y_0 соответственно по оси ОХ и ОУ. Согласно [А6, А16, А42, А45] P_X и P_Y можно определить, как:

$$P_X = 1 - \frac{(X_0 - a_L - b)^2}{(X_0 - a_L)(X_0 - b)} \quad \text{и} \quad P_Y = 1 - \frac{(Y_0 - a_H - d)^2}{(Y_0 - a_H)(Y_0 - d)}, \quad (4.22)$$

Следует выделить, что здесь a_L и a_H – длина и ширина участка контроля дополнительным методом НК, назначенного по данным АЭК, а X_0 на Y_0 – размеры области сосуда, входящей в локационный АЭ кластер, определяющиеся как:

$$X_0 = (X_2 - X_1 + 2\Delta X + b) \quad \text{и} \quad Y_0 = (Y_2 - Y_1 + 2\Delta Y + d), \quad (4.23)$$

где X_1 (Y_1) — левая граница диапазона интервала распределения количества событий, спроецированных на ось OX (OY), приходящегося на сумму значений S_{\min} ; X_2 (Y_2) — правая граница диапазона интервала распределения количества событий, спроецированных на ось OX (OY), приходящегося на сумму значений S_{\max} , где:

$$S_{\min} = 0,05 \cdot \int_{i=f_{\min}}^{f_{\max}} f_i(N) dN \quad \text{и} \quad S_{\max} = 0,95 \cdot \int_{i=f_{\min}}^{f_{\max}} f_i(N) dN, \quad (4.24)$$

здесь f_i — величина в i -м значении распределения проекций событий локационного кластера на ось X (Y), заключенная между минимальной и максимальной координатами локационного кластера по оси X (Y), то есть ($f_{\min} \dots f_{\max} = X_{\min} \dots X_{\max}$ ($Y_{\min} \dots Y_{\max}$)).

Если АЭ события в локационном кластере выделить невозможно (АЭ события немногочисленны или распределены равномерно на большой площади, или параметрические АЭ критерии оценки степени опасности показывают наличие активного источника АЭ, но на локационной карте нет АЭ событий), то, обычно, назначается дополнительный НК в наиболее опасных местах в пределах активной антенной группы АЭ-преобразователей [224]. Тогда P_s рассчитывается, как площадь возможной реализации события, приходящейся на элемент контроля каждого вида (патрубок люка, штуцер, сварное соединение и т.д.), то есть [Аб]:

$$P_s^* = \sum_l^c \frac{S_c}{S_\Sigma} \cdot P_c, \quad (4.25)$$

где S_c — площадь возможной реализации события, приходящаяся на c -элемент контроля; P_c — вероятность обнаружения дефекта в зоне контроля c -элемента, которую можно также определить по формулам (4.22) как вероятность перекрытия зоны контроля дополнительным методом НК ($a_L \times a_H$) площади дефекта ($b \times d$) в пределах S_c .

4.3.5. Другие методы исследований

В данном пункте обозначаются методы обработки и анализа экспериментальных данных, которые использовались в настоящей работе, но при этом широко известны и имеют подробное описание в доступных литературных источниках. В связи с этим, они здесь только перечисляются без разъяснения.

В п. 5.1 Главы 5 для исследования точности установления контрольных признаков в дискретных и непрерывных сигналах АЭ (п. 4.1.1 Глава 4) использовалось пять видов частотно-временных преобразований: оконное преобразование Фурье (Short-Time Fourier Transform или STFT), вейвлет-преобразование (Wavelet Transform или WT), псевдопреобразование Вигнера-Вилля (Smoothed Pseudo Wigner Distribution или SPWD), преобразование Чои-Вильямса (Choi-Williams Distribution или ChWD) и

псевдопреобразование Гильберта-Хуанга (Hilbert-Huang Transform или ННТ) [162-167, 225-227]

При реализации предлагаемого метода для расчета кривых спектральной плотности мощности (СПМ) в качестве алгоритма частотно-временного преобразования использовался метод модифицированных периодограмм Уэлча (P.D. Welch) с оконной функцией Хэмминга (R.W. Hamming) [145, 228].

Оценка эффективности применения предлагаемого метода иерархического анализа шумоподобной АЭ проводилась с применением статистических методов. При этом в качестве объекта сравнения использовались результаты применения стандартного метода амплитудной пороговой дискриминации [6, 41 и др.] для решения тех же задач при том же объеме контрольных выборок. При наличии достаточного количества априорных данных сравнение проводилось методом Байеса [157]. При наличии экспериментальных данных, полученных АЭ методом и другим методом неразрушающего контроля, сравнение проводилось по матрице достоверности [6].

Среднее значение и доверительные интервалы оценки всех контрольных параметров проводился методом Стьюдента при уровне надежности 0,95.

Выводы по главе 4

В настоящей главе приведены методы, способы и средства получения опорных данных и контрольных выборок (объектов исследований), использованных в работе для реализации и проверки работоспособности предлагаемого иерархического метода анализа шумоподобных сигналов от аэрогидродинамических и трибологических источников АЭ, что потребовало:

1. Модификации алгоритма кластеризации по скорости и дисперсии изменения АЭ, которая заключалась в переходе от параметра «интенсивность АЭ», способ расчета которого не раскрыт в первоисточнике, к хорошо зарекомендовавшему при анализе непрерывной АЭ параметру «среднеквадратичное значение сигнала»;

2. Модификации алгоритма плоскостной локации, которая заключалась в использовании в качестве исходных данных результатов кластеризации кадров записи АЭ по форме подобия их кривых спектральной плотности мощности;

3. Разработку метода оценки вероятности обнаружения координат источников АЭ с учетом возможного промаха в оценке его координат по причине назначения по АЭ данным дополнительного неразрушающего контроля в области, не совпадающей с дефектной зоной.

Глава 5. Исследование вариантов реализации метода иерархического анализа шумоподобной акустической эмиссии и сигналов на уровне шума

Настоящая глава посвящена исследованию возможности применения в предлагаемом методе иерархического анализа шумоподобной АЭ и сигналов на уровне шума алгоритмов и параметров оценки АЭ, отобранных по результатам анализа литературных данных в Главе 3.

5.1. Исследование вариантов частотно-временного преобразования

Исследование и выбор алгоритма частотно-временного преобразования (ЧВП) из пяти отобранных (п. 3.2 Глава 3) проведен на основании сравнения результатов их преобразования трех видов модельных сигналов специального вида. Описание модельных сигналов и их контрольных параметров приведено в п. 4.1.1 Главы 4. Результаты частотно-временного преобразования модельных сигналов приведены в таблицах 5.1-5.3 и на рисунках А1-А3 Приложения А, а также в работе [А12]. Из них следует, что ЧВП одинаково отображают основные закономерности изменения в сигналах, но с разной степенью детализации (частотно-временным разрешением).

При STFT применялись следующие основные оконные функции [229, 230]: треугольное окно Барлетта (Bartlett), окно Ханнинга (Hanning), окно Блэкманна (Blackmann), окно Гаусса (Gaussian), окно Хэмминга (Hamming) и окно Блэкманна-Харриса (Blackmann-Harris). Лучшие результаты получены при использовании последних двух окон, но далее обсуждаются результаты только последнего. STFT показал среднее расхождение определения контрольных временных точек изменения в сигналах 1 и 2 типа около 8,34 мкс, а частот – (по 1 сигналу) 0,45 кГц. По ширине полос вокруг главного максимума на рисунках А1–А3 и доверительному интервалу в таблицах 5.1 и 5.2 видно, что точность STFT более чем в 4 раза уступает ННТ, ChWD и SPWD, но лучше WT в 2 раза. При этом WT имеет в 1,2 раза меньшее среднее расхождение определения контрольных временных точек в сигналах 1 и 2 типа, которое составляет 6,94 мкс, но в 13 раз большее частотное расхождение, которое составляет (по сигналу 1 типа) 6,05 кГц. При WT специально использовался только один вид базисной функции – вейвлет Морле (Morlet), который, исходя из литературного обзора, наиболее часто применяется в практике АЭ. Известно [165, 231], что эффективность применения WT всецело определяется правильностью выбора типа вейвлета, который зачастую субъективен. Поэтому, скорее всего, подбором оптимально вейвлета для каждого типа сигнала возможно улучшить полученные результаты, но данный вопрос есть смысл исследовать

при адаптации WT под каждую конкретную задачу. Однако такую работу имеет смысл проводить при направленном применении WT для обнаружения АЭ конкретного типа. При этом для шумоподобной АЭ, которая чаще всего формируется несколькими одновременно действующими источниками АЭ разного вида, подбор оптимального вейвлета для анализа сигналов является не тривиальной и отдельно стоящей задачей. В данной работе задача ставится, как выбор универсального ЧВП для обнаружения сигналов нескольких типов. Поскольку работы [232, 233] показывают, что в случаях большой вероятности неудачного выбора базисной функции WT, его следует заменять на более надежные ЧВП.

Таблица 5.1 - Оценка ЧВП по контрольным параметрам модельного сигнала 1 типа

Параметр сравнения	Реальное значение	Определенное по спектрограмме				
		<i>STFT</i>	<i>WT</i>	<i>SPWD</i>	<i>ChWD</i>	<i>HHT</i>
t_2 , мкс	830,0	826,9±36,6	828,1±75,8	833,7±15,9	833,4±13,9	832,9±10,8
t_3 , мкс	1460,0	1458,1±49,6	1461,6±17,6	1463,7±12,2	1462,9±5,2	1460,8±3,0
t_4 , мкс	1770,0	1786,5±37,9	1782,3±5,5	1785,8±136,5	1780,8±11,5	1779,8±25,7
f_2 , кГц	180,0	180,7±43,4	185,9±87,3	180,6±5,6	180,7±9,2	180,2±3,2
f_3 , кГц	365,0	364,8±46,5	371,2±122,9	364,9±4,8	364,9±12,2	365,6±2,9
f' , кГц	нет	нет	нет	272,1±5,5	25,1±46,0	нет

Таблица 5.2 - Оценка ЧВП по контрольным параметрам модельного сигнала 2 типа

Параметр сравнения	Расчетное значение	Определенное по спектрограмме				
		<i>STFT</i>	<i>WT</i>	<i>SPWD</i>	<i>ChWD</i>	<i>HHT</i>
t_{S_0} , мкс	68,5	69,3±62,7	74,6±28,0	нет	нет	нет
t_{A_0} , мкс	195,5	214,9±101,8	208,3±42,9	206,6±26,9	204,6±20,5	203,5±11,8
A_0/S_0	~ 25,0*	23,2±2,8	30,6±4,5	нет	нет	нет

Таблица 5.3 - Оценка ЧВП по контрольным параметрам модельного сигнала 3 типа

Параметр сравнения	Расчетное значение	Определенное по спектрограмме				
		<i>STFT</i>	<i>WT</i>	<i>SPWD</i>	<i>ChWD</i>	<i>HHT</i>
f_0 , кГц	93,0	79,1±30,6	78,7±48,2	80,8±19,5	78,2±28,6	70,4±44,9
f_1 , кГц	186,0	155,7±28,9	169,7±72,4	153,7±20,6	156,2±21,8	145,8±85,2
f_2 , кГц	279,0	248,5±14,7	301,1±125,4	270,3±9,3	274,4±7,1	нет
f' , кГц	нет	нет	нет	120,8±25,5 216,2±13,6	15,3±28,1 113,3±25,1 214,2±18,7	нет
N , шт	нет	11,0±2,0	14,0±6,0	18,0±7,0	16,0±3,0	13,0±4,0

Из таблиц 5.1-5.3 и рисунков А1–А3 видно, что минимальные доверительные интервалы, а значит разброс значений, имеют преобразования HHT, ChWD и SPWD. Расхождение определения контрольных временных точек изменения в сигналах 1 и 2 типа составляет 8,57; 6,55 и 5,37 мкс, и частот – (по 1 сигналу) 0,35; 0,4 и 0,4 кГц, соответственно, т.е. они обладают лучшим частотным разрешением. Однако

преобразования SPWD и ChWD имеют существенные интерференционные артефакты, что хорошо видно на рисунках A1–A3 и таблицах 5.1 и 5.3, по параметру f' . Артефакты имеют STFT и WT, но они гораздо меньше по энергетическому уровню относительно частотных составляющих, где происходит главное изменение, поэтому возможно их подавление более простыми средствами. Сравнивая SPWD и ChWD между собой видно, что ChWD имеет меньшее количество интерференционных составляющих вокруг главных частотных изменений в сигнале, но существенные артефакты в низкочастотной области, которая наиболее важна при анализе сигналов, полученных в условиях высокого затухания. Использование способов борьбы с этим эффектом согласно [163, 164, 234, 235] показали, что при уменьшении сглаживания результат ChWD приближается к SPWD, который в свою очередь стремится к STFT. Кроме этого, высокая вычислительная сложность и отсутствие быстрых алгоритмов SPWD и ChWD затрудняет их использование при обработке сигналов в реальном времени (он-лайн) [164].

Рисунок A2 показывает, что результат ЧВП максимально близок к расчетным дисперсионным кривым у SPWD, ChWD и ННТ. При этом ННТ позволяет разглядеть флуктуации частоты на моде S_0 , что недоступно при применении других преобразований. Однако при пятикратной разнице амплитуды между модой S_0 и A_0 четкой видимой на спектрограммах остается только мода S_0 . Тогда, как STFT и WT при худшем частотном разрешении отображают моду A_0 с достаточным для ее идентификации энергетическим уровнем с близким к расчетному соотношению A_0/S_0 (таблица 5.2). Последнее логично вытекает из теоремы Парсеваля, но поскольку для достижения лучших результатов использовались процедуры усреднения по всем осям, то возможны отклонения A_0/S_0 от расчетного значения, которые должны быть учтены при ЧВП, что и проверялось. В отличие от STFT и WT повышение чувствительности SPWD и ChWD невозможно, поскольку ему сопутствует увеличение ложных частотных составляющих (артефактов), либо критическое снижение частотно-временного разрешения.

На основании всех вышеуказанных недостатков SPWD, ChWD и WT не выбраны для реализации в предлагаемом иерархическом методе. ННТ показал самое высокое частотно-временное разрешение, но он также не выбран для реализации в предлагаемом методе. Поскольку его применение еще требует проработки вопросов повышения чувствительности и способов выделения информационной составляющей из спектрограмм, что связано с следующим. Способы оценки флуктуации главных частотных компонент и выделения по ним основной информационной составляющей сегодня еще не проработаны. Процедура ННТ самодостаточна (адаптивна) и в

стандартной реализации не имеет настроечных параметров, позволяющих повысить его чувствительность [226, 227]. Возможно, сегодня исследуются модификации ННТ, включающие настроечные (управляющие) параметры, но поскольку на момент выполнения работы такие публикации в открытых источниках установлены не были, то этот вопрос не исследовался.

Из полученных результатов следует, что при достаточном запасе в соотношении [частота дискретизации / максимальная частота спектра] STFT позволяет получить частотно-временное разрешение на уровне других ЧВП. Конечно, это требует большего объема для хранения данных и более скоростных средств их записи и обработки, но данный вопрос не является проблемным для сегодняшнего уровня развития АЭ аппаратуры. Также при использовании STFT выполняется меньшее количество подготовительной работы, направленной на установление оптимальных настроечных параметров. Поэтому применение STFT всегда на выходе гарантирует получение результата, пусть даже не самого лучшего по сравнению с другими ЧВП. STFT также имеет и модификации повышающие его информативность, например, [236]. Однако на текущем этапе работы они рассматриваются в качестве потенциала для дальнейшего повышения эффективности STFT, который имеет смысл задействовать при решении конкретной технической задачи. Поэтому при решении текущей задачи по апробации и общей оценке работоспособности предлагаемого иерархического метода модифицирование STFT не рассматривалось. Кроме этого, STFT сегодня является основным инструментом гармонического анализа, описывается с помощью двух действительных функций (\sin , \cos) или одной комплексной (\exp), а также имеет: достаточно простые физические интерпретации, наиболее полные теоретические выкладки / доказательства и множество хорошо отработанных быстрых алгоритмов расчета, позволяющих организовать алгоритмы обработки АЭ данных в режиме он-лайн. При этом согласно выкладкам п. 2.2 Главы 2 перед STFT ставится задача получения кривых СПМ АЭ с минимизацией растекания спектра и ухудшения разрешающей способности. Согласно [228] этим требованиям соответствует вариант STFT: метод модифицированных периодограмм Уэлча (P.D. Welch). Таким образом, степень проработанности STFT позволяет уже сегодня на его базе создать рабочий инструмент, и поэтому он выбирается в качестве основного ЧВП в настоящей работе. Поскольку принципиально предлагаемый многоуровневый метод не накладывает ограничений на вид используемого при анализе шумоподобной АЭ ЧВП, то при необходимости

повышения ее чувствительности к источнику АЭ конкретного типа может быть использовано частотно-временное преобразование другого вида.

5.2. Исследование алгоритмов шумопонижения и кластеризации

Исследование и выбор вариантов шумопонижения и кластеризации АЭ данных заключались в оценке результатов вариационного применения выбранных в п. 3.3 и п. 3.6 Главы 3 двух широкополосных спектральных алгоритмов фильтрации сигналов и трех алгоритмов кластерного распознавания источников АЭ. Подробное описание алгоритмов фильтрации и кластеризации приведено в п. 4.3 Главы 4. Исходными данными для проведения исследований были выбраны шумоподобные АЭ сигналы, полученные в различных условиях трения и изнашивания стандартного четырехшарикового узла трения с использованием типового испытания на трение и износ [210]. Подробное описание трибологических испытаний, условий смазывания и контактирования рабочих поверхностей узла трения приведены в п. 4.1.2 Главы 4. Необходимые опорные данные для исследований получены по методам п. 2.5.1 Главы 2. Однако, поскольку получение функций шумопонижения и величин мер сравнения является частью исследований, то прежде чем перейти к описанию результатов исследований, рассмотрим процедуры их получения.

5.2.1. Функции шумопонижения

Из описания алгоритмов фильтрации п. 4.3.1 Главы 4 видно, что результат шумопонижения определяется качеством функций $S_n(f)$ и $K_n(f)$, т.е. качеством записи и анализа шума. Однако, как отмечалось ранее, в рамках обозначенного в работе широкополосного беспорогового подхода анализа АЭ предпочтительными являются процедуры фильтрации, позволяющие не удалить какие-то спектральные составляющие, а выровнять (сделать равнозначными) изменения в спектре во всей рассматриваемой полосе частот. При этом основными мешающими факторами, возникающими при АЭ диагностике и мониторинге динамических объектов контроля (оборудования) являются: I) общий шум рабочих технологических процессов, происходящих в объекте контроля; II) шум нормального трения в подвижных соединениях объекта контроля; III) постоянная периодическая помеха или шум, проявляющиеся в какой-то части цикла работы какого-то узла или механизма объекта контроля; IV) собственные резонансы преобразователя АЭ и V) не исследуемые высокоэнергетические источники шума на объекте контроля или акустически связанные с ним (внешние, наложенные). Данная проблема была обозначена

в [А13, А38]. Поэтому в рамках данного подхода были разработаны процедуры получения функций $S_n(f)$ и $K_n(f)$, которые сведены в таблицу 5.4 и позволяют повысить соотношение сигнал-шум при описанных выше ситуациях с использованием алгоритмов п. 4.3.1.1 и 4.3.1.2 Главы 4. Рассмотрим их подробнее.

Целью применения фильтра f_I является снижение влияния на результат анализа АЭ данных всех механических и электрических помех, возникающих на работающем объекте контроля с включенными двигателями, приводами, насосами и др. механизмами, не связанными с процессами или элементами, диагностируемыми с помощью АЭ. Фильтр f_{II} предназначен для снижения влияния на результат анализа АЭ данных общего рабочего акустического фона сопровождающего нормальный режим работы (эксплуатации) диагностируемых элементов объекта контроля. Фильтр f_{III} предназначен для снижения влияния на результат анализа АЭ данных периодического (тактового) шума, постоянно возникающего (присутствующего) в объектах контроля, работающих по замкнутому циклу. Фильтр f_{IV} предназначен для снижения влияния на результат анализа АЭ данных искажения спектра сигналов, возникающих из-за неравномерного пропускания различных частот (собственных резонансов) преобразователем АЭ и волноводом. Фильтр f_V предназначен для снижения влияния на результат анализа АЭ данных неравномерности приращения изменений в спектре сигналов на различных частотах, связанных с затуханием сигнала при распространении (для основных материалов пропорционально минимум квадрату частоты) или обилием на объекте контроля не исследуемых низкочастотных источников шума (вибрация панелей, шум шарикоподшипников и т.д.).

Указанные фильтры для условий проведения акустических исследований, получали следующим образом (рисунок 5.1).

АЭ образ шума для фильтра f_I записывался на полностью подготовленной к проведению исследований машине трения ЧМТ-1 путем ее запуска в режиме испытаний, но без контакта элементов четырехшарикового узла трения.

АЭ образ шума для фильтра f_{II} записывался аналогично процедуре получения АЭ образа шума для фильтра f_I , но с тем отличием, что обеспечивался контакта элементов четырехшарикового узла трения под минимальной нагрузкой равной усилию собственного веса нагрузочного рычага (~ 1 кгс). Трение при этом происходило в жидком смазочном материале.

АЭ образ шума для фильтра f_{III} получали по записям АЭ, полученным при сопровождении стандартных испытаний на машине трения ЧМТ-1 по [210], в которых не наблюдались схватывание, задиры и сваривание контактных поверхностей узла трения.

Таблица 5.4

№ п/п	Тип фильтра	Описание функции шумоподавления	Этап и процедура получения функций $S_n(f)$ и $K_n(f)$ с помощью метода п. 2.5.1 Главы 2
f_I	п.4.3.1.1 Глава 4	$S_n(f)$ – средний спектр АЭ механических и электрических шумов (помех) от рабочих, но не исследуемых технологических процессов в объекте	АЭ образ шума записывается на не работающем объекте контроля, при этом активируются все механизмы и электрические схемы, участвующие в рабочем режиме, но не приводятся в работу те элементы или процессы, которые являются целью проведения АЭ диагностики или мониторинга
f_{II}	п.4.3.1.1 Глава 4	$S_n(f)$ – средний спектр рабочего АЭ шума трения в подвижных соединениях объекта контроля, но на минимальной нагрузке, при которой не происходит их существенного повреждения	АЭ образ шума записывается на режимах работы объекта контроля, на которых невозможно появление критических повреждений, а при наличии повреждений на режимах, когда уровнем энергии от их действия можно пренебречь. При этом режимы имитации должны быть схожи с режимами эксплуатации объекта контроля
f_{III}	п.4.3.1.1 Глава 4	$S_n(f)$ – средний спектр АЭ-постоянной (тактовой) составляющей работы какого-то узла или механизма объекта контроля	АЭ образ записывается при имитации всех эксплуатационных нагрузок возможных в исследуемом объекте контроля с выделением частоты постоянной периодической составляющей посредством нахождения пятой автокорреляционной функции кадров записи АЭ. Энергия фильтра f_{III} перед применением нормируется до уровня фильтра f_{II} коэффициентом α в формуле (4.5) и (4.10)
f_{IV}	п.4.3.1.1 п.4.3.1.2 Глава 4	$S_n(f)$ или $K_n(f)$ – средняя амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) используемого при записи АЭ преобразователя и волновода	АЭ образ записывается при калибровке ПАЭ используемых при диагностике или мониторинге объекта контроля. Допускается составлять $S_n(f)$ или $K_n(f)$ по паспортным АЧХ преобразователей. Энергия фильтра f_{IV} перед применением нормируется до уровня фильтра f_{II} коэффициентом α в формуле (4.5) и (4.10)
f_V	п.4.3.1.2 Глава 4	$K_n(f)$ – функция, позволяющая привести спектры кадров АЭ к среднему энергетическому уровню во всем диапазоне частот (до неравномерности не более $\pm 5 \div 10$ дБ). Энергия постоянного (несущего) процесса приводится к равной взвешенной степени значимости в каждой выделенной полосе частот	АЭ образ записывается аналогично f_{III} с той разницей, что отбираются кадры АЭ, принадлежащие значимым АЭ событиям и по ним строится средний спектр. Затем средний спектр относительно задаваемого уровня чувствительности АЧХ (в основном это уровень $0,3 \div 0,5$ энергетической шкалы спектра) переводится в коэффициенты $K_n(f)$, при этом на задаваемом уровне чувствительности значение $K_n(f)=1$. Энергия фильтра f_V перед применением нормируется до уровня фильтра f_{II} коэффициентом α в формуле (4.5) и (4.10)

АЭ образ шума для фильтра f_{III} получали по записям АЭ, полученным при сопровождении стандартных испытаний на машине трения ЧМТ-1 по [210], в которых не наблюдались схватывание, задир и сваривание контактных поверхностей узла трения. Далее каждая запись АЭ подвергалась процедуре определения пятой автокорреляционной функции по методике [237], после чего спектры записей кадров АЭ усреднялись.

АЭ образ шума для фильтра f_{IV} получали при определении амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и проверке работоспособности использованного в исследованиях широкополосного ПАЭ на генераторе калиброванных акустических импульсов. Описание ПАЭ и генератора калиброванных импульсов приведено в п. 4.2 Главы 4, а здесь лишь отметим, что калибровка ПАЭ проводилась непосредственно перед проведением исследований.

АЭ образ шума для фильтра f_V получали аналогично процедуре получения АЭ образа шума для фильтра f_{III} , но с тем отличием, что использовались записи АЭ, полученных в испытаниях, в которых наблюдались схватывание, задир и сваривание контактных поверхностей узла трения. Далее в каждой записи АЭ определялись частотные области, в которых происходили изменения спектра и для каждой из них устанавливались коэффициенты коррекции, которые приводили изменения к равной взвешенной степени значимости по выделенным полосам частот, определяющих отличие критических процессов трения и изнашивания друг от друга.

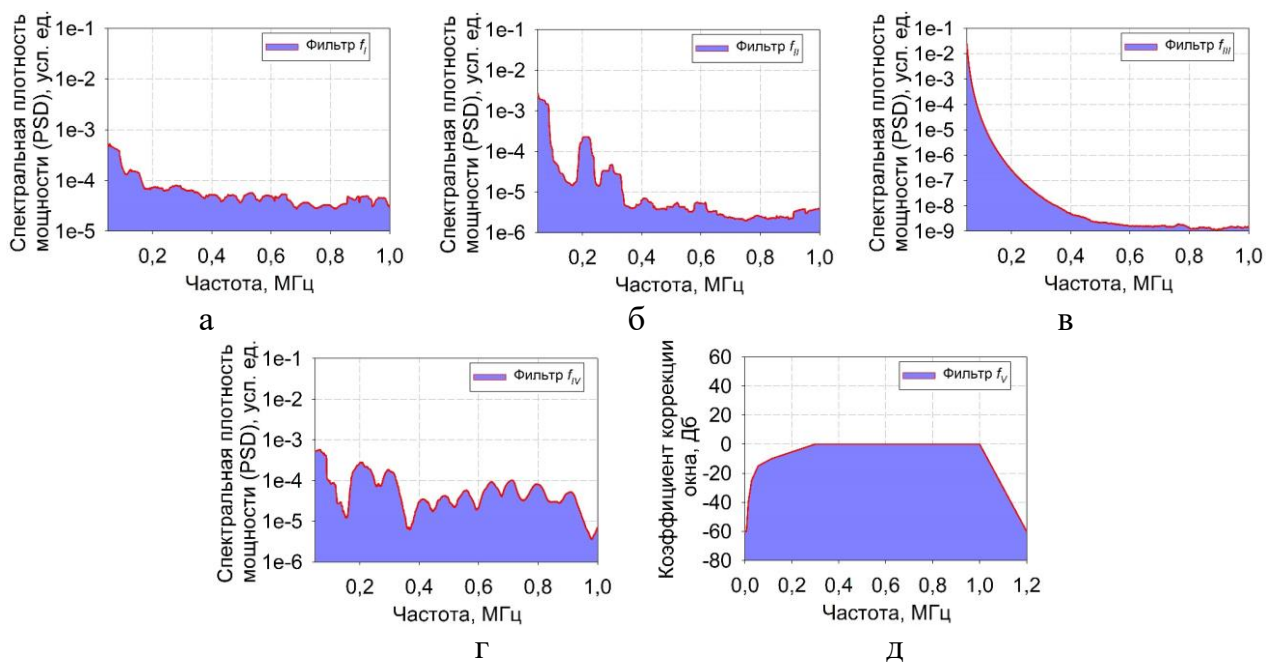


Рисунок 5.1 – Вид функций $S_n(f)$ и $K_n(f)$ фильтров $f_I \div f_V$ полученных для условий проведения акустических исследований.

На рисунке 5.1 представлен итоговый вид средних спектров или АЭ образов фильтров шума в виде функций $S_n(f)$ и $K_n(f)$, полученных, соответственно для фильтров $f_l - f_v$ путем усреднения 10 кадров АЭ, записанных для проведения акустических исследований при обозначенных выше условиях.

5.2.2. Опорные данные для проведения исследований

Для получения опорных данных применялся метод п. 2.5.1 Главы 2, который для данного случая заключался в проведении нескольких основных и специальных испытаний на четырехшариковой машине трения ЧМТ-1 при различных условиях смазывания узла трения, что позволило выделить основные критические точки и доминирующие механизмы изнашивания.

Сначала проводились стандартные испытания по методике [210] которая заключалась в многократном повторении испытания длительностью 10 секунд каждый раз с новым узлом трения (шариками) и порцией смазочного материала. Однако при каждом последующем повторении испытания нагрузка на узел трения P увеличивается с шагом согласно стандартному ряду методики. Задир признается если по итогу испытания диаметр пятна износа D , более предельно-допустимого значения $[D]$, обозначенного в методике для конкретной величины P . Если в испытании достигается момент трения $M_{TP} \geq 1180 \pm 25$ Н·см, то признается сваривание поверхностей трения. Соответственно минимальная нагрузка P , при которой достигнуто первое условие считается критической нагрузкой по задире и обозначается P_k , а по второму условию – нагрузка сваривания, обозначаемая P_c (п. 4.1.2 Глава 4). Параллельно аналогично работе [A15] проводились микроскопические исследования пятен износа с целью установления доминирующего (основного) механизма изнашивания, которые разделяли на: абразивный износ (в виде царапин), адгезионный износ со схватыванием в отдельных точках (царапины + схватывание в отдельных точках), адгезионный износ со схватыванием по площади, задир и сваривание поверхностей. В переходных (комбинированных) случаях повреждения рассчитывалась площадь, занятая каждым видом повреждения (царапинами, схватыванием в точках и схватыванием по площади), а доминирующий механизм износа присваивался виду, имеющему наибольший след (занимаемый процент площади). Объем и схема получения данных при микроскопических исследованиях представлены на рисунке 5.2.

Далее по результатам оценки испытаний трибологическими и металлографическими методами отбирались наиболее показательные из них, где наблюдалось либо

преимущественное повреждение только одним механизмом изнашивания, либо несколькими конкурирующими, а также требующими уточнения (если ключевые моменты изменения АЭ происходили в середине или начале испытания). Для них по записи АЭ для каждого испытания определялись АЭ признаки критических точек (п. 2.5.1 Глава 2).

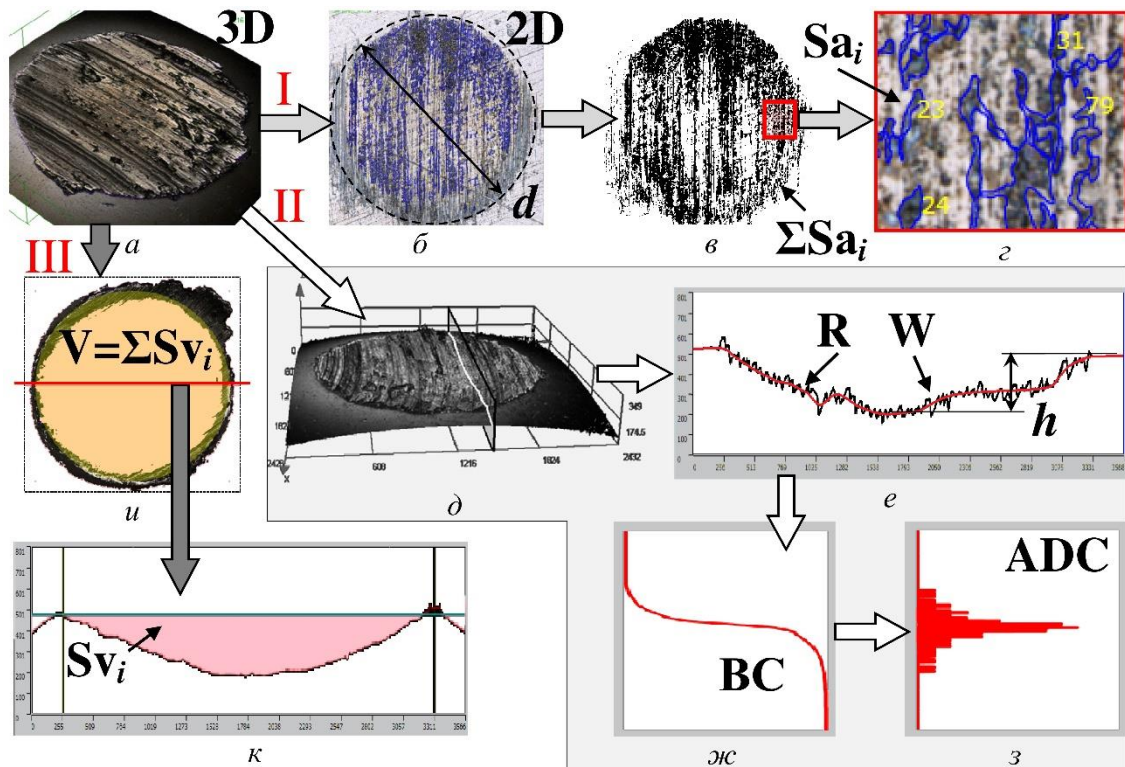


Рисунок 5.2 - Объем микроскопических данных, использовавшихся при установлении критических точек и механизмов изнашивания, где: 3D – трехмерный скан повреждения, 2D – масштабированное фотографическое изображение, d – линейный размер повреждения, ΣSa – общая площадь повреждения по рельефу, Sa – площадь повреждения конкретного вида (царапины, схватывания, пластическое отеснение), V – объемный износ, h – линейный износ, R – шероховатость, W – волнистость, Sv – площадь сечения повреждения, BC – опорная кривая профиля, ADC – распределение неровностей профиля по высоте

Далее эти испытания многократно повторялись, но с остановкой (прерыванием) каждого последующего испытания во время наступления соответствующего АЭ-признака (критической точки) с целью микроскопического изучения повреждений при нем. В случае если задир или сварка контактных поверхностей происходили в начале испытания (не возможно было поймать и остановить испытание в момент АЭ-признака), то нагрузка на узел трения снижалась. Такой прием позволял увеличить время до наступления АЭ-признака. Таким образом, в специальных испытаниях по методу получения опорных

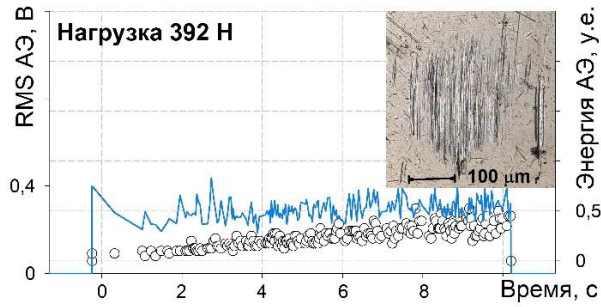
данных нагрузка на узел трения и время испытаний менялись, а скорость скольжения шариков нет. Начальная температура во всех испытаниях была комнатной.

Затем, после понимания в каких испытаниях каким образом повреждаются поверхности трения в пределах времени наблюдения путем многократной обработки АЭ данных, полученных с переборкой значений обозначенных критериев сравнения K_s (нескольких итераций) были найдены оптимальные значения, при которых наблюдалась логическая связь (совпадение) между проявлением АЭ кластеров и критическими точками смены доминирующих механизмов изнашивания, подтвержденных средствами испытаний и дополнительных исследований. Такая работа проводилась для каждого выбранного метода кластеризации АЭ данных, но для примера рассмотрим реализацию метода получения опорных данных п. 2.5.1 Главы 2, а именно алгоритма установления связи между повреждениями и АЭ данными только для алгоритма R -квадрат (п. 4.3.2 Глава 4).

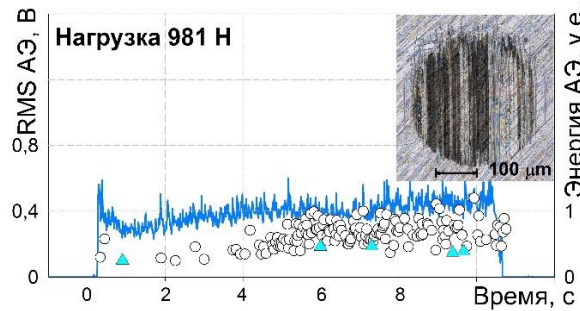
На рисунках 5.3 и 5.4 приведены результаты, полученные при обработке АЭ данных основной серии испытаний (таблица 4.2 Глава 4) с применением критерия [R -квадрат] $\geq 0,85$. Забегая вперед отметим, что демонстрируемый результат получен по схеме « $F1+f1+K1$ », которая из всех исследованных вариантов показала наибольшую информативность, поэтому и используется в качестве примера. На левых частях рисунков 5.3 и 5.4 приведены данные, полученные для моторного масла, а справа – для консистентных смазочных материалов. В центральной части рисунков 5.3 представлены результаты разделения АЭ данных на кластеры, а в их правом верхнем углу микрофотографии наблюдаемых повреждений узла трения в этих испытаниях.

Из рисунка 5.3 видно, что на малых нагрузках в установившемся режиме трения-скольжения преобладает режим абразивного изнашивания со следами повреждения в виде регулярных мелких царапин (или борозд). В этих условиях доминируют сигналы АЭ O -типа (рисунок 5.3а, а также белая область I на рисунках 5.4). С увеличением контактной нагрузки в дополнение к царапинам на контактной поверхности наблюдаются признаки локального разрушения масляной пленки в виде разогрева и адгезии поверхностей трения в отдельных точках (начало схватывания). При этом начинают регистрироваться сигналы Δ -типа (рисунки 5.3б,е,ж и желтая область II на рисунках 5.4). Количество этих сигналов увеличивается с увеличением нагрузки и в конечном итоге начинает превалировать во всем временном ряду изменения АЭ (рисунок 5.3ж и желтая область II на рисунках 5.4).

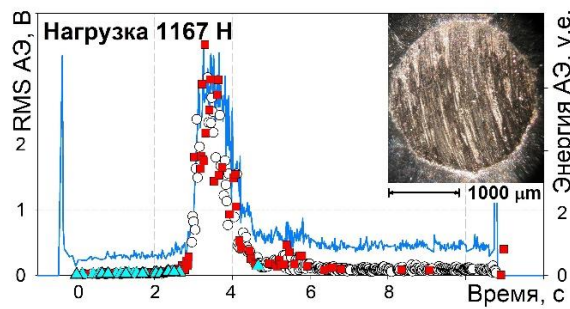
Моторное масло



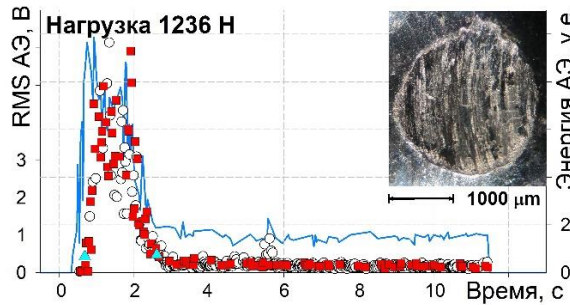
а



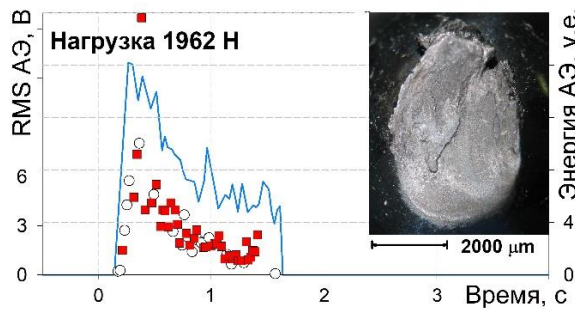
б



в

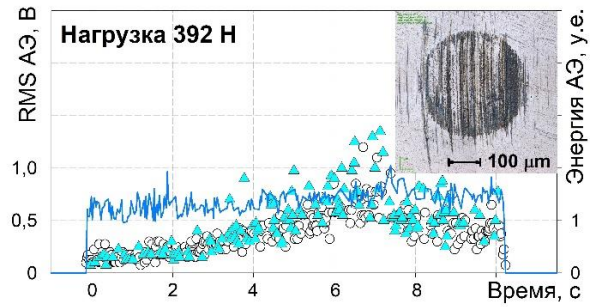


г

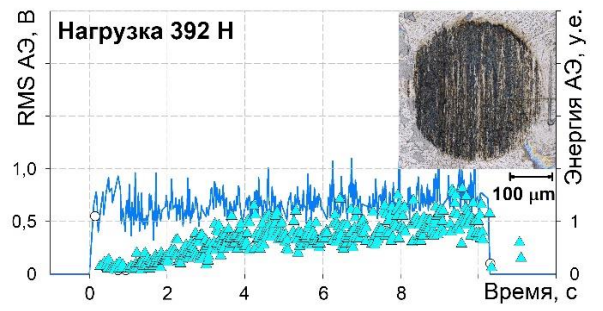


д

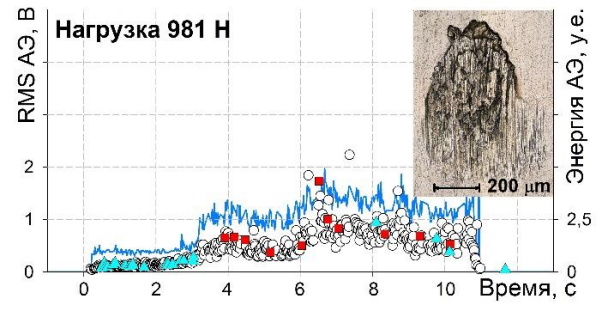
Консистентные смазки



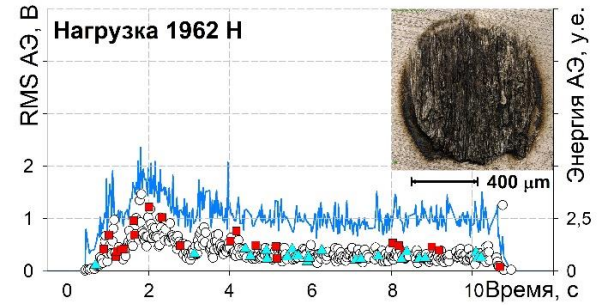
е



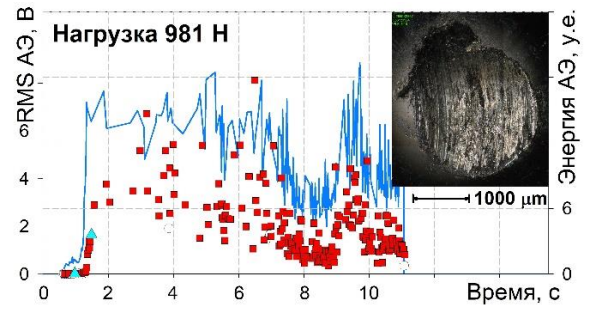
ж



з



и



к

Рисунок 5.3 - Результаты кластеризации АЭ данных полученных при испытаниях моторного масла (а – д) и консистентных смазок (е – к) на ЧМТ-1 с использованием схемы обработки данных «F1+f₁+K1», где сигналы АЭ соответствуют кластерам: ○ - абразивного износа; ▲ - адгезионного износа схватыванием в отдельных точках; ■ - адгезионного износа с отеснением металла (присущего схватыванию по площади, задиру и сварке узла трения); — - RMS АЭ.

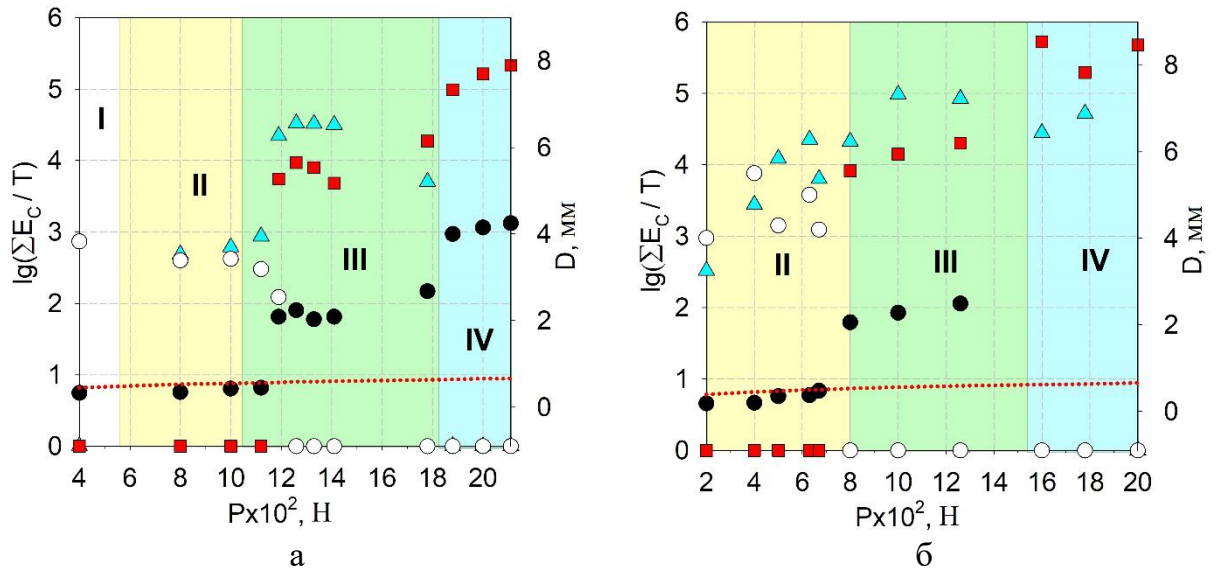


Рисунок 5.4 – Пример показывающий изменение энергии сигналов АЭ в каждой группе событий (кластере), регистрируемых при различных нагрузках P в стандартных испытаниях по [210] в среде моторного масла (а) и консистентной смазки (б). Кластеры сигналов АЭ ○, ▲ и ■ – типа имеют ту же цветовую кодировку, что и на рисунке 5.3., ● - соответствуют среднему диаметру пятна износа D полученному при соответствующей нагрузке в испытании P , а - линия предельно-допустимого размера износа $[D]$ при превышении которой ● признается задир поверхностей по [210].

Тоже наблюдается и на микрофотографиях рисунков, где с увеличением нагрузки площадь, занятая следами схватывания, постепенно увеличивается до полного покрытия ими пятна контакта (рисунки 5.3а,б,е,ж).

При дальнейшем увеличении нагрузки характер адгезионного изнашивания постепенно меняется от слабого в точках к сильному, что проявляется в виде областей схватывания с пластическим оттеснением материала (микрофотографии рисунков 5.3з,и).

В этом случае дополнительно к сигналам ▲-типа начинают регистрироваться сигналы ■-типа, а количество сигналов ○-типа уменьшается. Сигналы ■-типа всегда наблюдаются при $D > [D]$, что согласно [210] соответствует задире (рисунки 5.3в-д,з-к, а на рисунке 5.4 зеленая область III показывает ситуацию задире поверхностей без сварки, а голубая область IV задире со сваркой трением – рисунок 5.3д). Таким образом, в более тяжелых условиях трения, когда смазочный материал теряет несущую способность и допускает адгезионное изнашивание поверхностей схватыванием с отрывом или пластическим оттеснением слоя материала с последующей сваркой поверхностей трением, преобладают сигналы ■-типа (рисунок 5.3в,г,д,к).

Обозначенные выводы также хорошо просматриваются и на рисунке 5.4, где сведены результаты кластеризации АЭ данных по серии отдельных испытаний (в том

числе и показанных на рисунке 5.3), полученных при различной нагрузке P в виде «суммарной энергии АЭ сигналов в кластере отнесенная (нормированная) ко времени испытания (E_c/T)» (можно также назвать «кумулятивной средней мощностью кластера»), а также указан диаметр повреждения (D).

При этом также логично, что по сравнению с моторным маслом у консистентных смазок прихватывание поверхностей происходит при меньших нагрузках. Поэтому в их испытаниях даже на малых нагрузках наблюдались следы схватывания в отдельных точках на что адекватно указывают и результаты кластеризации АЭ (рисунок 5.3е-з и рисунок 5.4б).

По результатам применения метода получения опорных данных п. 2.5.1 Главы 2 исходными данными для проведения исследований являлись следующие:

А) АЭ признаки критических точек трения и изнашивания в следующем объеме (здесь и далее величина интегральных параметров a_{es} и a_{rms} обобщенно обозначена \bar{U} , а \bar{U}_{bg} – их уровень при нормальном (линейном) режиме изнашивания узла трения по адгезионно-усталостному механизму):

- I. Плавное изменение среднего уровня \bar{U}_{bg} при параллельном детектировании сигналов \circ и \blacktriangle -типа отражает доминирующее изнашивание по адгезионно-усталостному механизму с схватыванием и разрывом точек в разных местах контакта, занимающих в общей сложности не более 15÷20 % от его площади.
- II. Наличие на среднем уровне \bar{U}_{bg} отдельных (различимых) выбросов интегральных параметров амплитудой $\bar{U}_{peak} \geq (1,1 \div 3) \cdot \bar{U}_{bg}$ временной длительностью $\Delta\tau = 0,1 \div 0,5$ с или более при параллельном детектировании сигналов \blacktriangle -типа отражает доминирующее изнашивание по адгезионному механизму путем схватывания и разрыва точек в разных местах контакта, занимающих в общей сложности не более 30% от его площади (рисунки 5.3 и 5.5).
- III. Резкое изменение общего уровня \bar{U} на величину $\bar{U} \geq 3 \cdot \bar{U}_{bg}$ с последующим спадом в пределах времени $\Delta\tau \approx 1 \div 5$ с при нагрузке $P \approx P_k$ (критическая нагрузка установленная для каждого смазочного материала по [210] – таблица 3.5) или в пределах $\Delta\tau \approx 10 \div 80$ с при $P < 0,6 \cdot P_k$ при высокой дисперсии \bar{U} (размахе $\Delta\bar{U}$) с параллельным детектировании сигналов \blacksquare -типа отражает доминирующее изнашивание по механизму пластического оттеснения материала по всей площади пятна контакта (рисунки 5.3 и 5.5).
- IV. Спад общего уровня \bar{U}_{bg} при наступлении признака III отображает время (скорость) приработки поверхностей трения после задира. Сам процесс приработки является переходным, поэтому при нем могут наблюдаться все три типа сигналов АЭ (рисунок

5.5), однако в конце приработки АЭ подчиняется признаку I, т.е. изнашивание переходит к адгезионно-усталостному механизму. Во всех случаях при наличии признака III уровень \bar{U}_{bg2} после задира всегда выше уровня до задира \bar{U}_{bg1} и диаметр пятна износа D выше предельно-допустимого значения $[D]$, заданного в методике [210] для конкретной нагрузки испытаний P . Последнее согласно обозначенным методикам испытаний соответствует задиру.

V. Общее количество наблюдаемых АЭ признаков III вида отражает общее количество задиров, произошедших на протяжении испытания. Доминирующий механизм изнашивания при этом соответствует III.

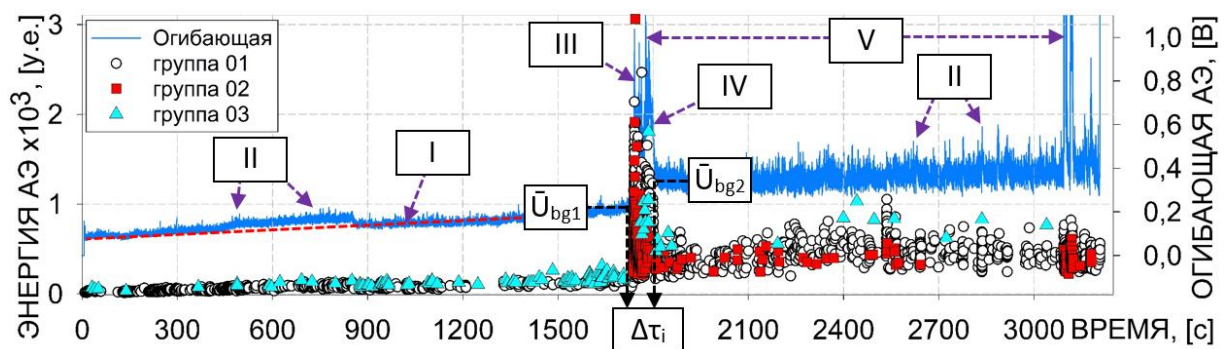


Рисунок 5.5 - Поясняющий рисунок к описанию интегральных АЭ признаков КТ на примере длительного испытания на ЧМТ-1 смазочного материала L1 по [210].

Кластеры сигналов АЭ \circ , \triangle и \blacksquare – типа имеют ту же цветовую кодировку, что и на рисунке 5.3.

Б) Средние кривые спектральной плотности мощности (СПМ) по каждому кластеру сигналов имеющих связь с основными установленными доминирующими механизмами изнашивания (п. 5.2.4 Глава 5): кластер \circ - нормальный режим трения с преимущественно абразивным износом; кластер \blacksquare - задр поверхности трения по адгезионному механизму износа с отеснением металла (присущего схватыванию по площади, задиру и сварке узла трения) и кластер \triangle - адгезионный износ схватыванием в отдельных точках.

В). Контрольная выборка записей АЭ в которую вошли 16 из 132 проведенных основных и уточняющих испытаний при различных условиях смазывания. Контрольная выборка содержала, как записи имевшие только определенный вид изнашивания, так и записи со сменой одного основного вида изнашивания на другой (аналогичные представленным на рисунках 5.3). При этом для последних были установленные точные временные метки: начала схватывания, начала и конца задира, и окончания приработки после задира (рисунок 5.5).

Г. Значения критериев (мер) сравнения выбранных методов кластеризации, позволяющие с одинаковой вероятностью обнаруживать основные механизмы изнашивания, что устанавливалось следующим образом.

5.2.3. Значения критериев (мер) сравнения выбранных методов кластеризации

Как отмечалось в п. 3.6 Главы 3, сегодня в алгоритмах кластеризации нет аргументированных методов подбора критериев сравнения (K_s), которыми в первом алгоритме является R -квадрат, во-втором метрика Махаланобиса, а в третьем границы областей двухпараметрического пространства «скорость изменения и дисперсия RMS» (п. 4.3.2 Глава 4). Поэтому значения критериев (мер) сравнения выбранных методов кластеризации устанавливались экспериментально, как обеспечивающие максимальную логическую связь (совпадение) между проявлением АЭ кластеров и критическими точками смены доминирующих механизмов изнашивания, подтвержденных средствами испытаний и дополнительных исследований, описанных выше. При этом на основании теории обнаружения шумоподобной АЭ первым настраивался алгоритм [R -квадрат] (п. 4.3.2.1 Глава 4), как в наибольшей степени реализующий идеологию предлагаемого алгоритма обнаружения сигналов по степени подобия кривых СПМ. При реализации которого при подборе значения критерия сравнения задавались следующие величины [R -квадрат] = 0,3; 0,6; 0,8 и 0,95. В результате было выявлено, что логическая связь между проявлением АЭ и доминирующими механизмами изнашивания наблюдалась только при уровне [R -квадрат] $\geq 0,8$, поэтому далее в акустических исследованиях для данного алгоритма была выбрана величина [R -квадрат] = 0,85. Результаты кластеризации АЭ данных на контрольной выборке принимались за эталонные (опорные) для других алгоритмов кластеризации, т.е. по отношению к ним выравнивалась чувствительность остальных выбранных для исследования алгоритмов, что выполнялось следующим образом.

Как было показано в 1 и 2 Главах, шумоподобная АЭ представляет собой сигнал сложной формы, который в амплитудной и частотной области невозможно адекватно описать малым количеством информативных параметров. Поэтому в рамках нашей реализации второго алгоритма (п. 4.3.2.2 Глава 4) применялась следующая гипотеза: описать все особенности АЭ шумоподобных источников и найти отличие между ними возможно только в многомерном пространстве амплитудных и спектральных признаков. При этом общее количество признаков должно быть достаточно большим, но таким, чтобы потребляемые машинные ресурсы при их вычислении и сравнении могли

позволить реализацию алгоритма в режиме on-line. Поэтому далее для тех же АЭ данных специальных испытаний были построены временные зависимости изменения всех основных оценочных параметров шумоподобной АЭ отобранных в п. 3.4 Главы 3. Графики показали, что из отобранных только 17 основных параметров ($a_s, a_{rms}, E'_s, H_a, \sigma_a^2, \gamma_a, s_a, W_f, W_{eff}, G_{rms}, G_{mean}, H_G, \sigma_G^2, \gamma_G, s_G, f_{med}, f_{rms}$) имеют заметное изменение при смене доминирующего механизма изнашивания, коррелирующее с трибологическими данными. Апробация разделения АЭ данных специальных испытаний в 17-ти мерном пространстве признаков показала результат на уровне применения первого алгоритма со значением [R -квадрат] $\approx 0,95$. Затем для повышения скорости обработки АЭ данных происходило уменьшение размерности пространства сравнения путем удаления из обработки одного параметра за другим с последующим сопоставлением результатов с первым алгоритмом при [R -квадрат] = 0,85. В итоге было получено минимальное количество информативных параметров, при которых сохранялся результат, сопоставимый с первым алгоритмом на заданном уровне, которое равнялось 12-ти мерному пространству следующих оценочных параметров (п. 3.4 Глава 3): a_{rms} - среднеквадратичное значение сигнала; E - энергия сигнала; σ_a - дисперсия сигнала; γ_a - эксцесс (kurtosis) сигнала; s_a - асимметрия (skewness) сигнала; f_{med} - медианная частота; W - мощность сигнала; G_{rms} - среднеквадратичное значение СПМ; W_{eff} - эффективная ширина СПМ; σ_G - дисперсия СПМ; γ_G - эксцесс (kurtosis) СПМ и s_G - асимметрия (skewness) СПМ.

В третьем алгоритме (п. 4.3.2.3 Глава 4) границы разделения событий при реализации способа сформировались аналогично [194], а именно: совпали места расположения основных доминирующих механизмов изнашивания в поле координат классификационных признаков модернизированного алгоритма и его прообраза. Однако значения границ классификационных признаков приводились к сходимости с результатами, полученными для этих же АЭ данных первым алгоритмом при [R -квадрат] = 0,85, которые в итоге имели следующие значения: $-22 < \langle rms \rangle \leq -16$ и $10^{-19} < \sigma_{rms}^2 < 10^{-14}$ – кластер I; $-20 < \langle rms \rangle \leq -12$ и $10^{-14} < \sigma_{rms}^2 < 10^{-11}$ – кластер II; $-18 < \langle rms \rangle \leq -6$ и $10^{-11} < \sigma_{rms}^2 < 10^{-6}$ – кластер III.

Таким образом, для проведения исследований на основе одних и тех же экспериментальных данных трибологических испытаний на ЧМТ-1 были настроены выбранные алгоритмы разделения АЭ данных, а также приведена (выравнена) их чувствительность к одним и тем же режимам трения и изнашивания модельного узла трения на уровне [R -квадрат] = 0,85. Результаты вероятности обнаружения описанных АЭ источников и вероятность ошибки их временной идентификации приведены на графиках

рисунка 5.7 с обозначением: «нет+K1», «нет+K2» и «нет+K3», где: K1 – алгоритм кластеризации R-квадрат (п. 4.3.2.1); K2 – модифицированный алгоритм кластеризации k-средних (п. 4.3.2.2); K3 – модифицированный алгоритм классификации по скорости изменения RMS (п. 4.3.2.3); «нет» – вариант без применения процедур шумопонижения (фильтрации).

5.2.4. Результаты исследований вариантов применения алгоритмов шумопонижения и кластеризации

Общая схема проведения исследований и их варианты представлены на рисунке 5.6, где: $a(t)$ – исходные данные (п. 4.1.2 Глава 4); F1 – алгоритм шумопонижения спектральным вычитанием (п. 4.3.1.1); F2 – алгоритм шумопонижения частотной коррекцией (п. 4.3.1.2); $f_I \div f_V$ – функции соответствующих образов фильтров шума $S_n(f)$ и $K_n(f)$ по п. 5.2.1; K1, K2, K3, «нет» и $\{\hat{a}_{rms}, E, \sigma_a, \gamma_a, s_a, f_{med} \dots \gamma_G, s_G\}(t)$ и $C_i(t)$ – расшифрованы в предыдущем пункте; $C_i(t)$ – присвоенный номер АЭ группы (кластера) по кадрам АЭ (т.е. с привязкой по времени регистрации t).

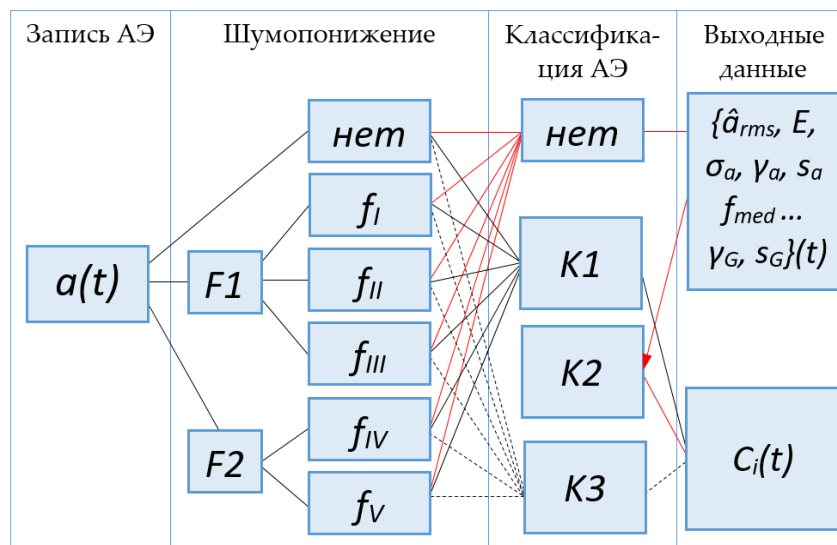


Рисунок 5.6 – Общая схема проведения исследований вариантов применения алгоритмов шумопонижения и кластеризации. Обозначения расшифрованы в тексте

Из рисунка 5.6 видно, что смысл акустических исследований заключался в прогоне одной и той же контрольной выборки $a(t)$ через 18 различных вариантов сочетания применения алгоритмов фильтрации и кластеризации данных со сравнением выходных данных с исходными (опорными) указанными в п. 5.2.2. Главы 5. Оценка качества результатов варианта обработки АЭ проводилась по следующим условиям и контрольным параметрам:

Условие (i): количество идентифицированных источников АЭ (кластеров) должно совпадать с количеством активных процессов разрушения поверхностей трения, установленных на основе трибологических данных и металлографических наблюдений. Здесь первым контрольным параметром служит число выявленных источников из трех основных (см. п. 5.2.2). При этом кластер \blacktriangle является переходным между двумя другими, поэтому именно его выявление определяет возможность ранней диагностики задир.

Второй контрольный параметр – вероятность обнаружения каждого из основных источников АЭ, которая определялась, как:

$$P_{01} = N_j / N_{\Sigma}, \quad (5.1)$$

где: N_j – количество кадров АЭ, отнесенных к одному из основных кластеров $j = 1, 2$ или 3 (\circ , \blacksquare или \blacktriangle); N_{Σ} – общее количество кадров АЭ, $N_{\Sigma} = \sum N_j$. N_j и N_{Σ} рассчитываются по кадрам или в промежутке между временными метками действия соответствующих источников, которые были установлены по методу п. 2.5.1 Главы 2 по каждой контрольной выборке и продемонстрированы выше в п. 5.2.2. При этом использовалось правило: если на контрольном временном участке испытания наряду с регистрацией сигналов 2 и 3 кластера, присутствует 1 кластер (\circ), то он считается помехой (ошибочно распознанными кадрами АЭ), а не признаком нормального режима изнашивания.

Условие (ii): время начала и окончания активности проявления идентифицированных источников АЭ (кластеров) должны совпадать с временем действия соответствующего процесса повреждения поверхностей трения, установленных по временным меткам. Контрольным параметром здесь являлась вероятность ошибки идентификации каждого из основных источников АЭ, которая определялась, как:

$$P_{02} = 1 - N_j / N_{j\Sigma}, \quad (5.2)$$

где: $N_{j\Sigma}$ – количество кадров АЭ, отнесенных к одному из основных кластеров $j = 1, 2$ или 3 (\circ , \blacksquare или \blacktriangle), но рассчитанное по всей контрольной выборке, т.е. и между, и за временными метками действия соответствующих источников, которые были установлены по методу п. 2.5.1 Главы 2 по каждой контрольной выборке и продемонстрированы выше в п. 5.2.2.

Условие (iii): количество сигналов АЭ в конкретных кластерах в пределах времени действия соответствующего механизма повреждения поверхностей трения должно быть максимально при минимальном количестве нераспознанных кадров АЭ. Контрольными параметрами здесь являются: 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.

Результаты расчета обозначенных контрольных параметров по контрольной выборке приведены на рисунке 5.7.

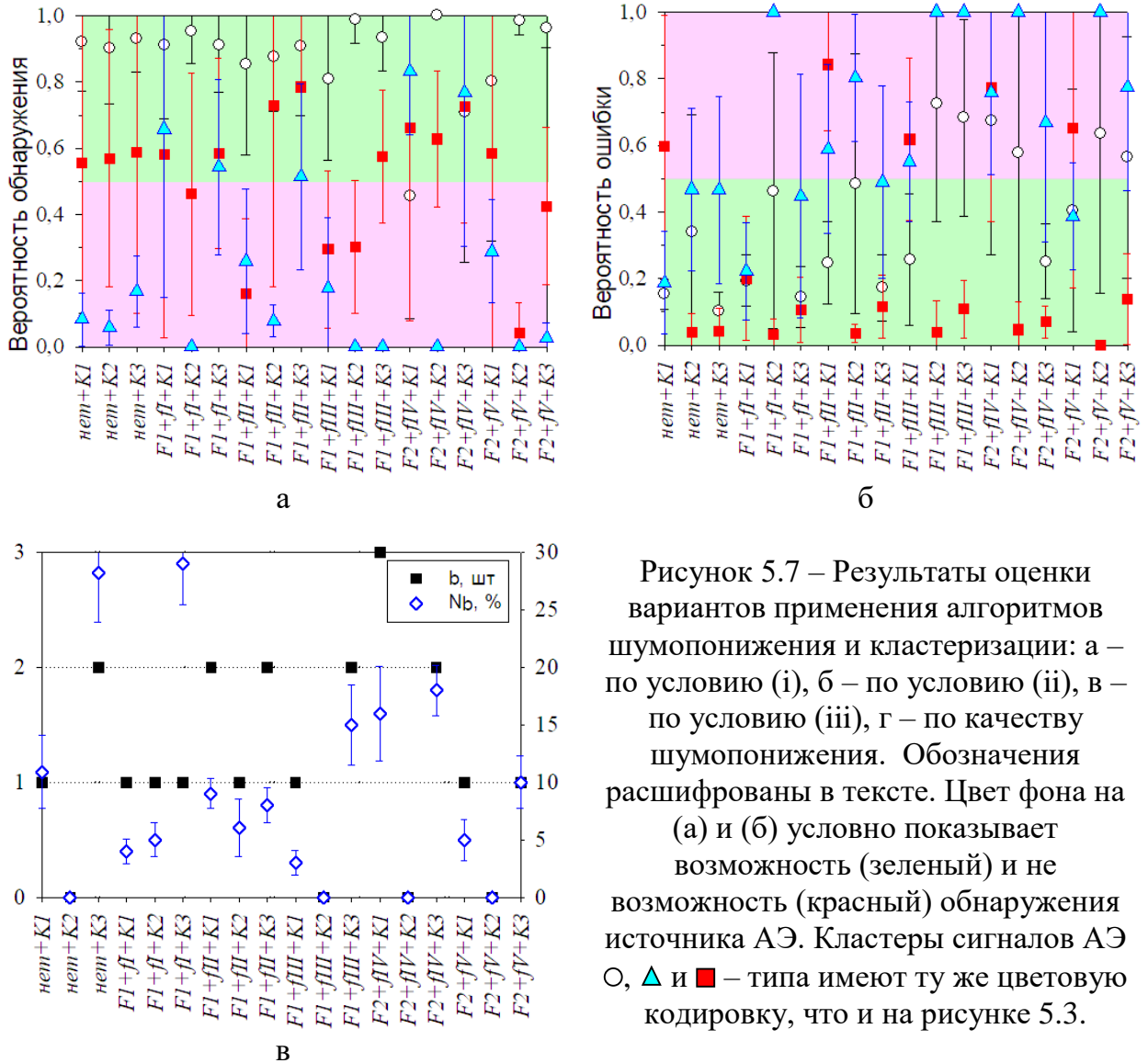


Рисунок 5.7 – Результаты оценки вариантов применения алгоритмов шумопонижения и кластеризации: а – по условию (i), б – по условию (ii), в – по условию (iii), г – по качеству шумопонижения. Обозначения расшифрованы в тексте. Цвет фона на (а) и (б) условно показывает возможность (зеленый) и не возможность (красный) обнаружения источника АЭ. Кластеры сигналов АЭ O, ▲ и ■ – типа имеют ту же цветовую кодировку, что и на рисунке 5.3.

Рассмотрим результаты и причины, обуславливающие их, на наиболее информативном и показательном примере, где в испытании на одной временной реализации наблюдается действие нескольких механизмов. Это рисунок 5.3в, на котором видно, что до 2 секунды испытания происходило адгезионное схватывание поверхностей трения в отдельных точках. Со 2 по 5 секунду происходил задира поверхностей путем схватывания с пластическим оттеснением слоя материала. После 5 секунды происходила приработка поверхностей после задира по преимущественно абразивному механизму.

Последнее также видно по микрофотографии пятна износа сферической формы без крупных борозд, рельеф поверхности которого сформирован царапинами в направлении скольжения на всю длину пятна. Результаты распределения кластеров по времени испытания, получаемых с использованием некоторых исследованных схем фильтрации и классификации АЭ для примера показан на рисунке 5.8.

Из рисунков 5.7 и 5.8 видно, что большинство схем сочетания применения алгоритмов шумопонижения с кластеризацией АЭ правильно выделяют группы (кластеры), соответствующие основным механизмам повреждения в виде абразивного и адгезивного изнашивания разного масштабного уровня, но с различной детализацией (чувствительностью), что через вероятность обнаружения отражается в количестве сигналов, отнесенных к соответствующему кластеру.

Видно, что абсолютно не чувствительными оказались комбинации « $F1+f_I+K2$ », « $F1+f_{II}+K1$ », « $F2+f_{IV}+K2$ » и « $F2+f_V+K2$ » (рисунки 5.7 и 5.8а), которые не позволили разделить сигналы от основных механизмов повреждения и поэтому признаны не пригодными для обозначенного в работе практического применения. Схемы « $F1+f_{III}+K2$ » и « $F1+f_{II}+K2$ » демонстрируют лишь частичный успех в виде распознавания сигналов АЭ от самых мощных источников (рисунки 5.7 и 5.8б), что является не удовлетворительным результатом по условиям (i)-(iii). Приемлемый результат выделения АЭ от основных механизмов повреждения позволяют получить схемы « $F1+f_{III}+K1$ », « $F1+f_{III}+K3$ » и « $F2+f_{IV}+K1$ » (рисунки 5.7 и 5.8в), однако количество сигналов в кластерах исследуемых источников минимально по сравнению с нераспознанными сигналами, т.е. данные схемы слабо обеспечивают выполнение условий (i) и (iii).

Схемы « $F2+f_{IV}+K3$ », « $F2+f_V+K1$ », « $F2+f_V+K3$ », « $F1+f_{III}+K3$ » и « $F2+f_{IV}+K1$ » дают разумные результаты, но помимо этого, неоправданно переразбивают (дробят) основные кластеры (рисунки 5.7 и 5.8г, д) на два или более. Этот эффект известен как «сверхкластеризация (over-clustering)», которая возникает, когда кластеры находятся слишком близко друг к другу или перекрываются, что приводит к проблемам детектирования АЭ событий и интерпретации результатов. В рассматриваемых примерах произошла переразбивка больших кластеров на более мелкие, что не так критично поскольку они могут быть объединены в один. Однако, применение этих схем требует либо введения дополнительных допущений в алгоритме кластеризации, либо проработки дополнительной логической процедуры автоматического объединения кластеров, которая в ручном режиме является трудоемкой и субъективной. По обозначенным причинам эти схемы также относим к не рекомендованным для текущего использования.

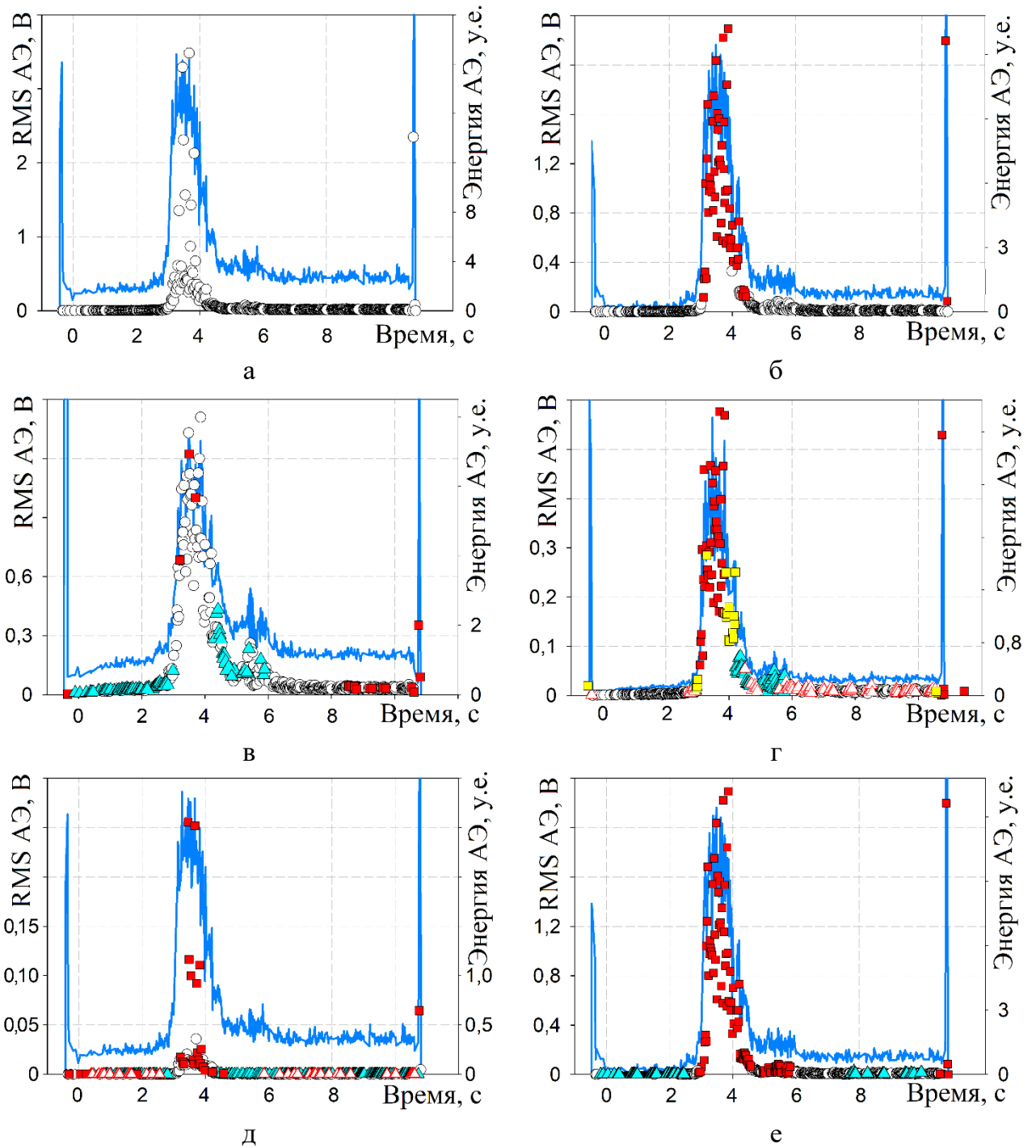


Рисунок 5.8 – Пример иллюстрирующий различное поведение RMS АЭ (— - линия) и результат разделения сигналов на группы при разных схемах обработки (рисунок 5.6) одного и того же массива АЭ данных сопровождения типового испытания на ЧМТ-1 (рисунок 5.3в), где схема обработки: а – «F1+f_I+K2», б – «F1+f_{II}+K2», в – «F1+f_{III}+K1», г – «F2+f_{IV}+K3», д – «F2+f_V+K1» и е – «F1+f_{II}+K3». Кластеры сигналов АЭ ○, ▲ и ■ – типа имеют ту же цветовую кодировку, что и на рисунке 5.3. На рисунках (д) и (е) показан пример переразбивки (дробления) кластеров, поэтому здесь сигналы ▲ - типа относятся к сигналам типа ○, а ■ - сигналы к типу ■.

Из указанного выше процента обнаружения сигналов различного типа видно, что схемы « $F1+f_{III}+K1$ », « $F1+f_{II}+K3$ » и « $F1+f_I+K1$ » также дают некоторую переразбивку основных кластеров, но она либо незначительна, либо не влияет на корректность детектирования АЭ событий.

Схемы « $F1+f_I+K1$ » (рисунки 5.7 и 5.8в), « $F1+f_I+K3$ » и « $F1+f_{II}+K3$ » (рисунки 5.7 и 5.8е) не имеют критических недостатков, указанных выше для других схем обработки. При этом полностью соответствуют установленным условиям качества результатов (i)-(iii). Поэтому эти схемы выбраны в качестве основных (базовых) вариантов для применения в предлагаемом методе иерархического анализа шумоподобной АЭ, описанного в Главе 2.

Следует также выделить, что большой разброс погрешности на рисунке 5.7 обусловлен тем, что контрольная выборка включала испытания при всех условиях смазывания, кроме воды (п. 4.1.2 Глава 4). 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 переразбитых 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} (рисунок 5.7а,б), но и повышается результативность применения ряда исследованных вариантов, в частности: « $F1+f_I+K3$ », « $F1+f_{II}+K3$ », « $F2+f_{IV}+K3$ », « $F2+f_V+K1$ », « $F2+f_V+K3$ ».

Из анализа результатов, описанных выше и представленных на рисунках 5.7 и 5.8, можно было бы заключить, что алгоритм $K2$, основанный на методе k -средних, неподходящий для обозначенных целей. Однако этот вывод, не совсем корректен, поскольку в исследовании потенциал этого «классического» метода кластеризации не был использован в полной мере. Так, наиболее вероятно, основной причиной полученного результата является процедура выбора 12-ти информативных параметров сравнения (кластеризации), которые оказались работоспособными только в схеме обработки шумоподобной АЭ без использования алгоритмов шумопонижения. Последние приводят к искажению величин основных информативных параметров АЭ, что критически изменяет, как пространство сравнения, так и месторасположение кластеров в нем. При этом алгоритмы $K1$ и $K3$ показали меньшую чувствительность к процедуре шумопонижения поскольку, во-первых, используют меньшее количество сравниваемых параметров, которые, во-вторых, не получили критического искажения. Таким образом, условия применения многопараметрического сравнения алгоритмом $K2$

для обработки шумоподобной АЭ требуют дополнительного исследования с применением способов снижения избыточности и повышения эффективности выбора информативных параметров, например, методом главных компонент (Principal Component Analysis или PCA) или факторного анализа [238]. Кроме этого, алгоритм $K2$ (k -средних) не имеет ограничений по количеству сравниваемых параметров и их виду (число, функция), поэтому дополнительно в объем сравнения аналогично $K1$ может быть добавлена функция кривой спектральной плотности (СПМ), которая является ключевой для возможности выделения источников шумоподобной АЭ. Последнее теоретически подтверждено в п. 2.2 Главы 2, а практически можно увидеть на примере распределений основных информативных параметров оценки АЭ, представленных на рисунке 5.9. Видно, что параметрическое отличие кластера ■-типа существенное, поэтому он выделяется всеми исследованными алгоритмами кластеризации, в то время, как границы кластера ▲-типа без данных по кластеризации АЭ по подобию формы кривой СПМ установить практически невозможно. На основании вышеизложенного можно утверждать, что добавление в объем сравниваемых при кластеризации данных кривых СПМ повысит эффективность алгоритма k -средних ($K2$). Поэтому считаем, что в рамках данного исследования работа по адаптации алгоритма k -средних для обработки и анализа шумоподобной АЭ не выполнена.

Также следует отметить, что использование алгоритмов обнаружения $K1$ и $K3$ без фильтрации данных демонстрирует результат, близкие к варианту « $F1+fi$ », что вполне объяснимо, поскольку данная процедура шумопонижения индуцируют минимальные искажения в спектрограммах АЭ и уменьшает относительно небольшую часть энергии сигнала. Тем не менее, без фильтрации количество нераспознанных сигналов АЭ является существенным. Таким образом, можно сделать вывод, что эффективное шумопонижение является ключевым этапом предварительной обработки данных, способствующим качественному распознаванию шумоподобной АЭ. Однако схема шумопонижения должна быть согласована с алгоритмов классификации (кластеризации) путем выбора и использования информативных параметров, сохраняющих АЭ признаки источников после применения процедуры фильтрации данных. Так, для контрольной выборки на рисунке 5.10а,б,в показаны средние кривые СПМ основных кластеров после применения обозначенных выше фильтров. Из рисунка 5.10 видно, что при всех вариантах шумоподавления достигается преследуемый эффект выравнивания значимости изменения СПМ между различными частотными областями, но с разной эффективностью и величиной потери части энергии сигнала.

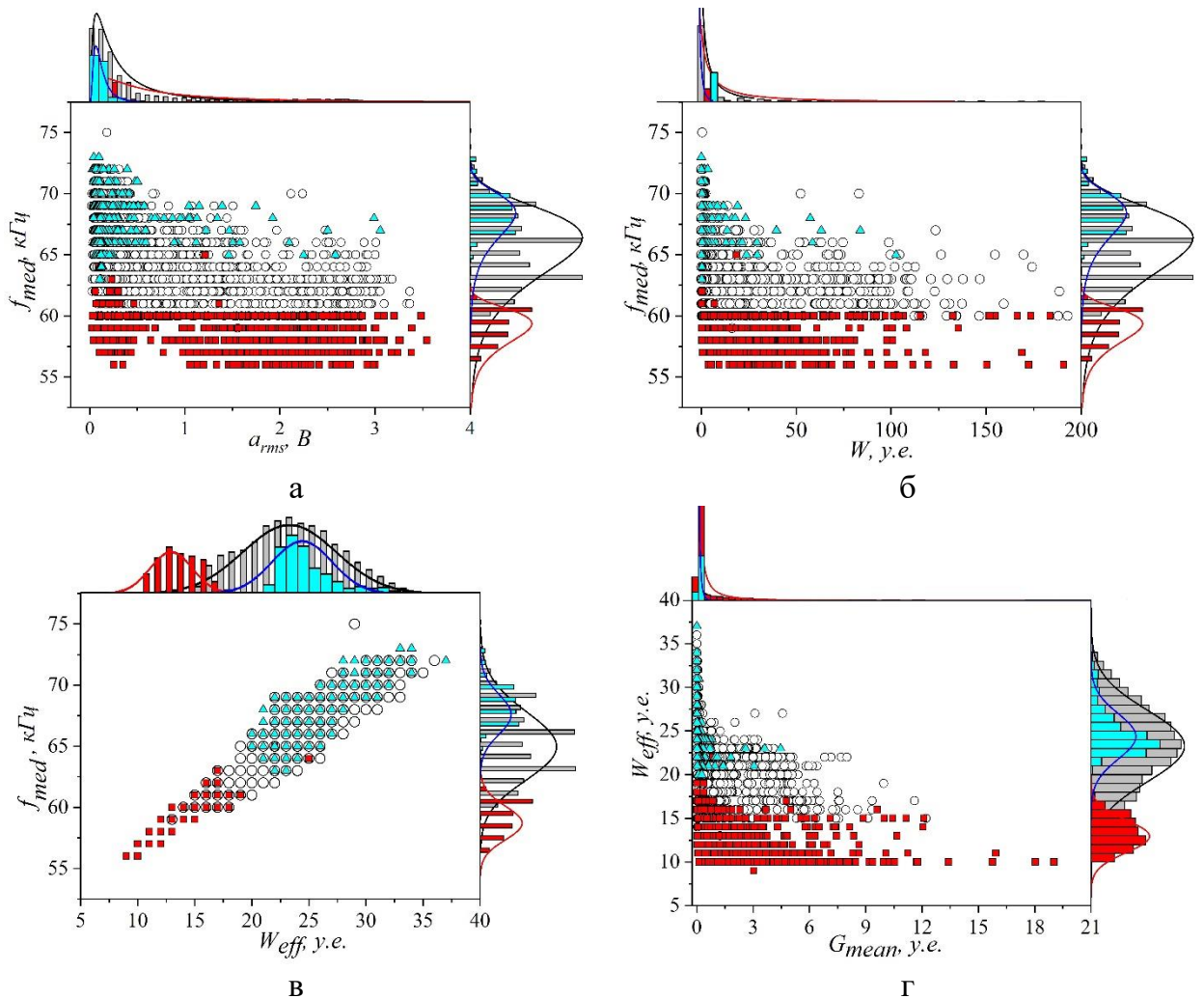


Рисунок 5.9 – Маргинальные гистограммы распределения основных оценочных параметров АЭ имеющих максимальные отличия после применения схемы « $F1+f_l+K1$ ». Кластеры сигналов АЭ \circ , \blacktriangle и \blacksquare – типа и их распределения имеют ту же цветовую кодировку, что и на рисунке 5.3.

Оценка эффективности шумопонижения была проведена с помощью применения следующих параметров [A13]: отношение среднего уровня a_{rms} в контрольных точках записи АЭ до (RMS_0) и после фильтрации (RMS_F); отношение среднего уровня a_{rms} при задире (RMS_z) к среднему уровню при нормальном режиме изнашивания (RMS_n) и разница медианной частоты (Δf_{med}) до (f_{med0}) и после фильтрации (f_{medF}) на контрольных записях, содержащих АЭ признаки нескольких видов повреждения (выборках подобных представленной на рисунке 5.8).

Из рисунка 5.10 также видно, что при шумопонижении ожидаемо происходит снижение величины энергетических характеристик АЭ, но и выравнивание значимости изменения СПМ во всем анализируемом диапазоне частот. Рисунок 5.10г показывает, что в зависимости от вида фильтра операция шумоподавления приводит к неизбежному снижению интегральной энергетической характеристики RMS_0/RMS_F в 1,1–10 раз, что

незначительно. Тогда, как вероятность параметрического обнаружения задира повышается существенно, что видно по параметру RMS_z/RMS_n , который изменяется в 15 – 86 раз. При этом установлено, что особую осторожность следует проявлять при использовании фильтров « $F1+f_{III}$ », « $F1+f_{IV}$ », « $F2+f_{IV}$ » и « $F2+f_V$ » в условиях низкого соотношения сигнал/шум, поскольку энергия фильтрующих функций $S_n(f)$ и $K_n(f)$ при способе их получения, указанном в п. 5.2.1, близка к достаточно высокой энергии АЭ, регистрируемой при трибологических испытаниях. Поэтому перед применением следует приводить энергию их фильтрующих функций $S_n(f)$ и $K_n(f)$ к уровню фильтрующей функции f_{II} , что уже отмечалось в таблице 5.4, но без пояснения. Также установлено, что чем больше параметр Δf_{med} , тем меньше доля энергии несущего процесса в АЭ сигнале.

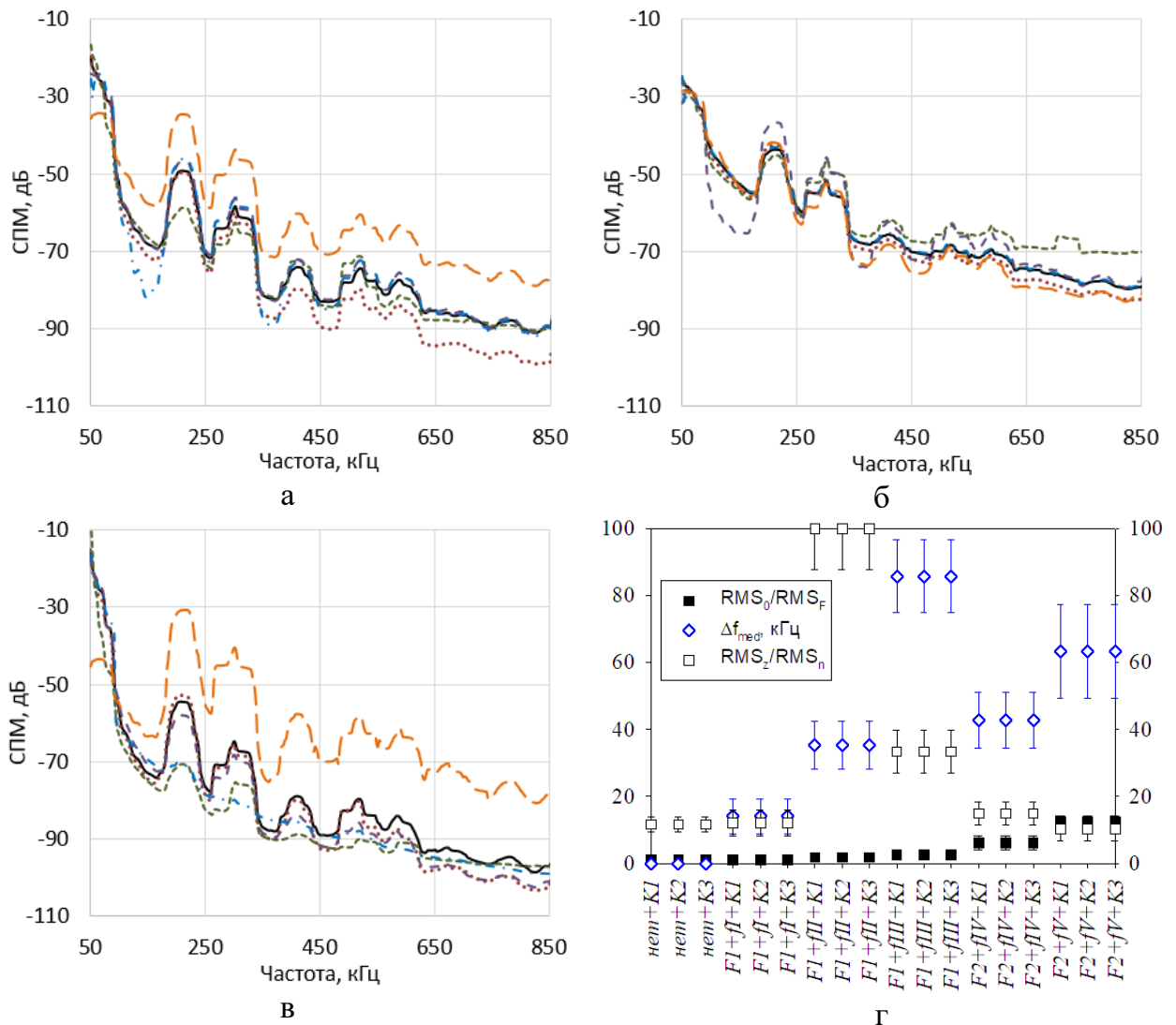


Рисунок 5.10 – Средние нормированные кривые СПМ кадров АЭ, отнесенных к кластеру: ○ - типа (а), ▲ - типа (б) и ■ - типа (в), где цвет и тип линии обозначает вариант: — - фильтрация не проводилась; - « $F1+f_I$ »; - - - - « $F1+f_{II}$ »; - - - - « $F1+f_{III}$ »; - . - . - « $F2+f_{IV}$ »; — — — — « $F2+f_V$ ». Остальные обозначения расшифрованы в тексте.

Таким образом, установлено, что при апробации предлагаемого метода анализа шумоподобной АЭ следует использовать схемы обработки « $F1+f_I+K1$ », « $F1+f_I+K3$ » или « $F1+f_{II}+K3$ ». Для исследования процессов трения и изнашивания материалов на I уровне обработки наибольшую чувствительность показали параметры: f_{med} , W_{eff} , функция СПМ. На II уровне обработки параметры: a_{es} или a_{rms} и параметры оценки изменения формы их кривых за цикл нагружения: среднее значение (\bar{U}); размах среднего значения ($\Delta\bar{U}$) и длительность существования АЭ признака ($\Delta\tau$). На III уровне обработки параметры: кумулятивная средняя мощность кластеров \blacktriangle и \blacksquare -типа (соответственно $E_{c\blacktriangle}/T$ и $E_{c\blacksquare}/T$ – рисунок 5.4).

Апробация данных параметров для обнаружения критических режимов трения и изнашивания приведена далее в п. 6.1 Главы 6. Более подробно результаты влияния алгоритмов шумоподавления на искажение интегральных характеристик АЭ без использования алгоритмов кластеризации и рекомендации по их применению описаны в [A13]. Также результаты данных исследований обсуждались на профильных конференциях [A33, A38, A43, A44, A46, A48] и подробно освещены в следующих изданиях [A1, A10, A11].

5.3. Сравнение предложенных критериев оценки класса опасности для II уровня метода

5.3.1. Опорные данные для проведения исследований

Для получения опорных данных и проведения исследований использовались результаты, полученные при различных условиях испытания материалов на рост усталостной трещины с применением цельных компактных образцов и плоских образцов со сварными швами в рабочей зоне. Описание материалов, геометрии образцов, средств и условия испытаний приведены в п. 4.1.3 Главы 4. Учитывая, что при всех испытаниях получены результаты, подчиняющиеся общим закономерностям, то их описание приводится обобщенно с уклоном на особенности, необходимые для: оценки работоспособности разработанных критериев, реализации предлагаемого метода анализа шумоподобной АЭ и его апробации на практике (п. 6.2 Глава 6).

Основной идеей применения предлагаемого метода анализа шумоподобной АЭ в данном направлении является оценка возможности раннего выявления усталостной трещины. Раннее обнаружение подразумевает наличие трещины малого размера, развитие которой сопровождается, как низкой амплитудой сигналов АЭ (на уровне шума)

при ее подрастании, так и редкостью самого события в виде ее подрастания. Получаемая при таких условиях АЭ по виду близка к шумоподобной, поэтому существующие критерии оценки класса опасности, разработанные для порогового способа регистрации АЭ [6, 10] в данном случае не работают или дают критическую ошибку. Однако наши результаты и данные работ [3, 239, 240] показывают, что устойчивым диагностическим признаком трещины могут быть сигналы АЭ от трения берегов трещины. Устойчивость данного диагностического признака обеспечивает то, что трение берегов трещины сопровождает каждое ее раскрытие и закрытие даже в случае отсутствия прироста длины (скачка) трещины. Для имитации и выделения сигналов АЭ от трения берегов трещины и ее скачков использовался способ, предложенный в работе [3, 239, 240], с дополнением приемов, предложенных в методе получения опорных данных в п. 2.5.1 Главы 2, и выполнялось следующим образом.

Сначала по стандартной методике [161] проводились испытания материалов до разрушения (рисунке 5.11а). Затем по данным графиков роста трещин строились кинетические диаграммы усталостного разрушения материала (КДУР) и определялись стадии развития трещины: I – стадия припорогового медленного роста трещины (по литературным данным скорость роста трещин на данном этапе составляет порядка 10^{-7} – 10^{-8} мм/цикл), II – стадия стабильного роста трещины (на данном этапе скорость роста трещины подчиняется закону Пэриса (P.C. Paris) и III – стадия ускоренного роста трещины с нелинейно увеличивающейся скоростью. По КДУР определялись n_I и n_{II} – соответственно, максимальный номер цикла, приходящегося на начало и конец линейной части КДУР (II стадии). По полученным n_I и n_{II} разделяли соответствующие стадии на графике роста трещины (рисунок 5.11а и б). Затем на новом образце выращивалась усталостная трещина до стадии стабильного роста трещины II (рисунок 5.11б), наличие которой устанавливалось по КДУР. Затем нагрузка снижалась до величины $0,8F_{max}$ (при всех неизменных других параметрах нагружения) и фиксировалось время выхода на заданный режим нагружения, где F_{max} – пиковая нагрузка в цикле на режиме выращивания трещины по стандартной методике [161]. При данной нагрузке трещина не росла, что подтверждалось по данным с датчика раскрытия трещины и тепловизором. Первый (рисунок 5.11б) показал колебание длины трещины равное $0,0093 \pm 0,0048$ 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 (рисунок 5.11в), который, как известно [241], сопровождает ее рост. Таким образом, на нагрузке $0,8F_{max}$ сигналы АЭ должны преимущественно быть связаны с трением берегов трещины.

Затем нагрузка увеличивалась до величины $1,25F_{max}$ и фиксировалось время начала и окончания выхода испытательной машина на заданный режим нагружения. Такой режим нагружения привел к увеличению скорости роста трещины (рисунке 5.11б) и восстановлению превышения температуры вокруг ее вершины по сравнению с остальной частью образца (рисунок 5.11в). Таким образом имитировался режим генерации более мощной АЭ, чем при нагрузке $1,0F_{max}$, что связано с большей пластической деформацией материала в вершине трещины и большей величиной приращения её длины.

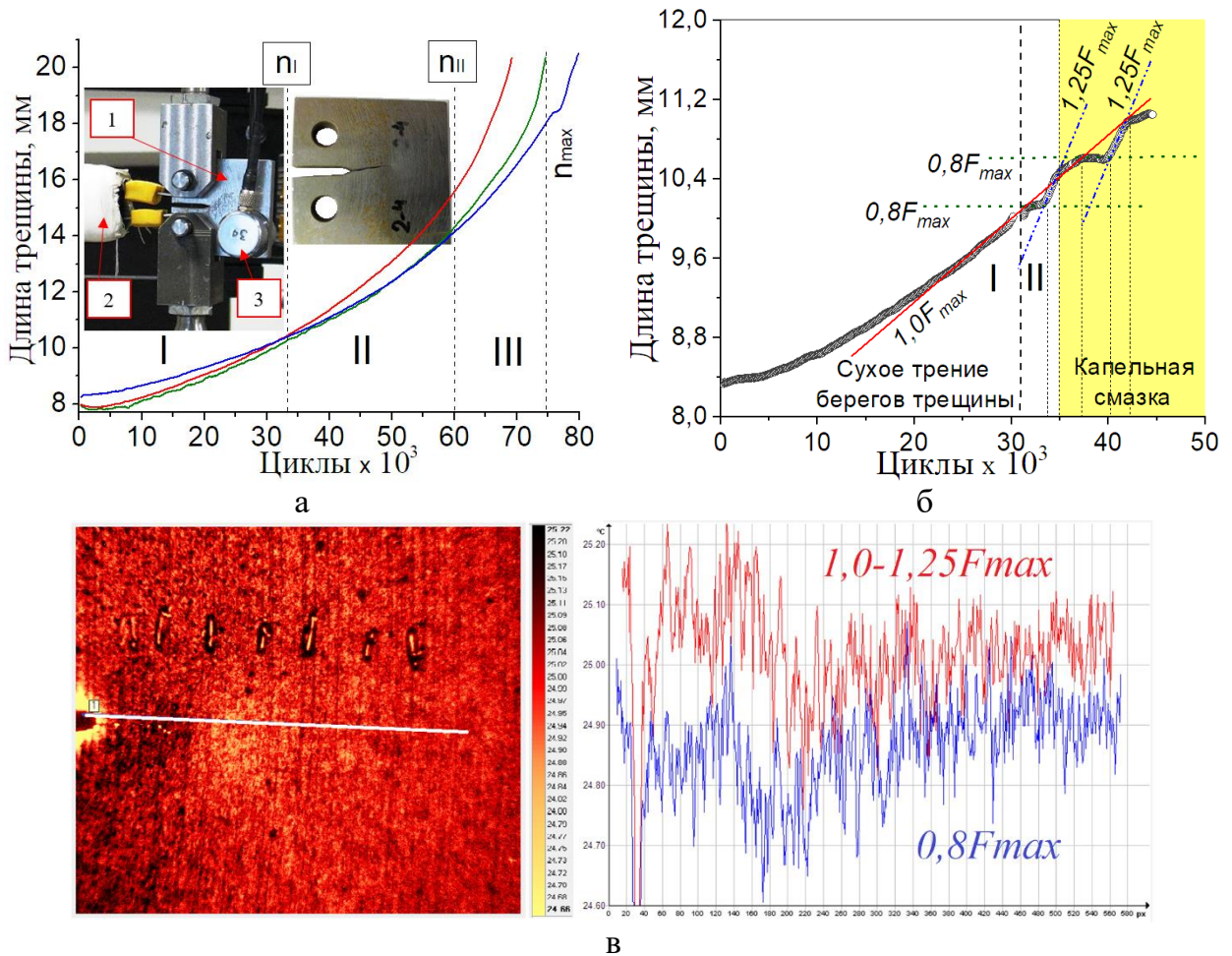


Рисунок 5.11 – Зависимость длины усталостной трещины от числа циклов нагружения в стали 20Л по стандартной методике (а) и методу получения опорных данных (б), где: 1 - фотографии образца до (в оснстке) и после испытания; 2 - тензометрический датчик раскрытия трещины; 3 – преобразователь АЭ. На рисунке (в) показаны тепловое поле вокруг трещины и распределение температуры по белой измерительной линии, проложенной по траектории роста трещины при нагрузке в циклах 0,8; 1,0 и $1,25F_{max}$.

Далее нагрузка возвращалась к первоначальной ($1,0F_{max}$) также с фиксацией времени начала и конца выхода на заданный режим. После чего с помощью шприца в устье трещины капельно вводился жидкий смазочный материал: минеральное индустриальное

масло И-20А SN-150 (OilRight, Россия). Данный смазочный материал не имеет присадок, устойчив к окислению, отличается пониженным пенообразованием и имеет высокий класс вязкости, поэтому под действием вибрации и капиллярных сил смазка затягивалась вглубь трещины и по мере продвижения выходила на края образца. Убедившись в выходе смазки на боковую поверхность образца в вершине трещины её подача прекращалась и повторно снижалась нагрузка до величины $0,8F_{max}$. После выхода испытательной машины на режим смазка берегов трещины повторялась и фиксировалось время работы трещины со смазкой. Затем повторно увеличивалась нагрузка до величины $1,25F_{max}$ и аналогичным образом смазывались берега трещины и фиксировалось время работы трещины со смазкой на данном режиме нагружения.

Поскольку АЭ и температура образца регистрировалась непрерывно, то по фиксированным временным меткам начала и окончания выхода на режим или введения смазочного материала возможно установить АЭ, сопутствующую различным механизмам ее генерации. Кроме этого, для понимания шума, сопровождающего работу гидравлической системы нагружения образца и трение в захватах, записывалась АЭ с компактного образца, в котором отсутствовал концентратор напряжения в виде выреза (рисунок 5.16). Жесткости образца было достаточно, чтобы гарантированно не могла в нем зародиться трещина за время записи АЭ. При этом АЭ записывалась при тех же условиях имитации обозначенных источников (т.е. при нагрузках 0,8; 1,0 и 1,25 от F_{max}) и два раза: до смазывания подвижных элементов захватов и после их смазывания.

Таким образом, был получен массив данных характеризующих, как шум работы испытательной машины, так АЭ, сопутствующую действию различных источников при росте трещины. Однако, прежде чем перейти к описанию результатов имитирования различных условий роста трещины и трения ее берегов, рассмотрим общие особенности проявления АЭ за время стандартных испытаний от зарождения трещины до излома образцов.

Для примера на рисунке 5.12 показан общий вид изменения АЭ за время испытания на рост усталостной трещины в вязком материале. Поскольку испытания длительные, то на демонстрирующих их рисунках для наглядности приведены записи по 2 цикла нагружения сделанные в различное время испытаний. Как видно из рисунков 5.12 и 5.13 в пределах 32 дБ АЭ преимущественно сформирована сигналами непрерывного вида на фоне которой имеется импульсная АЭ с максимумом значения в диапазоне 35÷40 дБ (шкала амплитуды показана без вычитания предварительного усиления). Средний уровень АЭ изменяется синхронно с циклом нагружения и в целом возрастает при

приближении к моменту разрушения (увеличивающийся тренд АЭ). Поэтому для повышения наглядности и демонстрации отличий АЭ на рисунке 5.14 приведены графики изменение энергии АЭ (E), а на рисунке 5.15 медианной частоты (f_m).

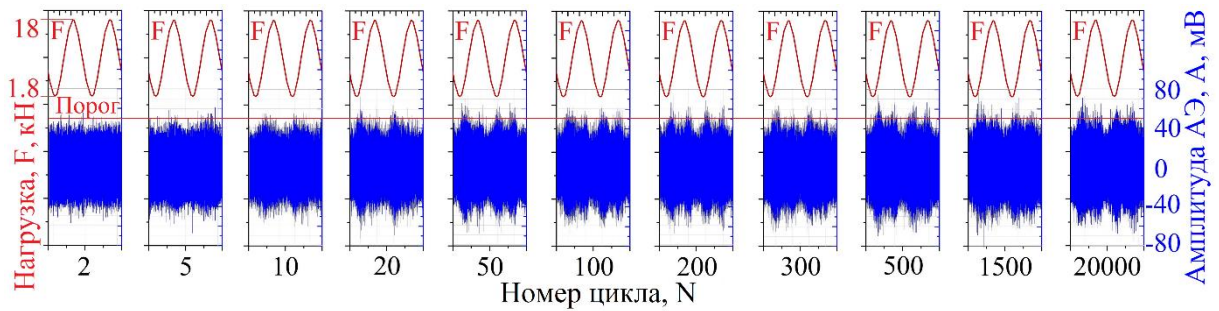


Рисунок 5.12 – Типичный вид эволюции АЭ за время испытания.

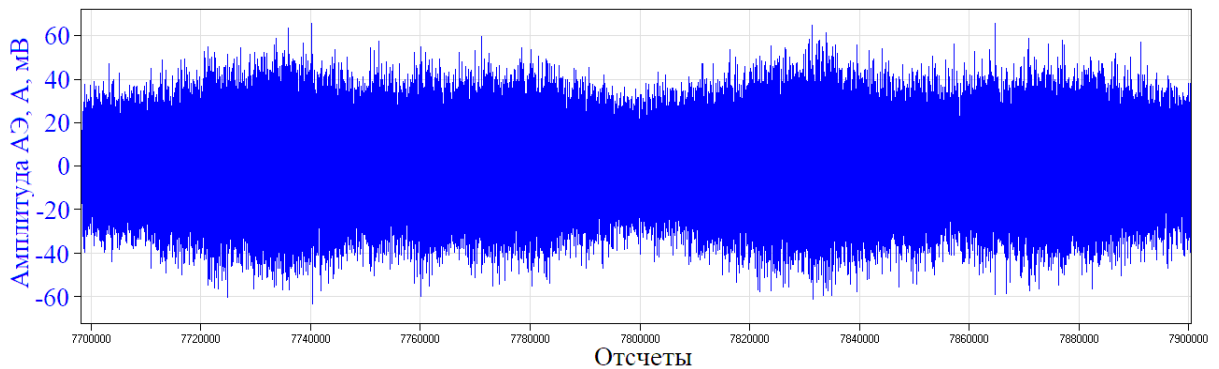


Рисунок 5.13 – Общий вид АЭ за два периода нагружения наблюдаемый на этапах ускоренного роста трещины.

Анализ результатов стандартных испытаний выявил следующие общие особенности изменения АЭ при росте усталостной трещины:

1). На записях АЭ, сопровождавших разрушение вязких материалов (стали 20Л, стали 3 и 09Г2С), не выявлено явно различимых периодических импульсных сигналов, связанных со скачками трещины при пиковой нагрузке в цикле нагружения, которые наблюдаются при хрупком разрушении материалов, описанных, например, в [242, 243]. При этом полученные результаты подтверждают работы [3, 239, 240], в которых расчётно и экспериментально показано, что пиковые значения АЭ за цикл нагружения наблюдаются дважды и не совпадают с пиком приложения нагрузки (рисунок 5.14).

2). Из рисунков 5.12 и 5.13 видно, что, несмотря на наличие высокоамплитудной АЭ сигналы имеют непрерывный (шумоподобный) вид, что, как уже отмечалось, характерно для вязких материалов. Данный факт осложняет идентификацию сигналов АЭ и интерпретацию АЭ данных при регистрации пороговым амплитудным методом (на рисунке 5.12 для примера показано, что будет зарегистрировано по амплитудному порогу

дискриминации, если его установить по условию регистрации до одной фоновой помехи в секунду на начало испытаний. При этом следует иметь в виду, что длительность отображенного на рисунке цикла равна 0,1 с).

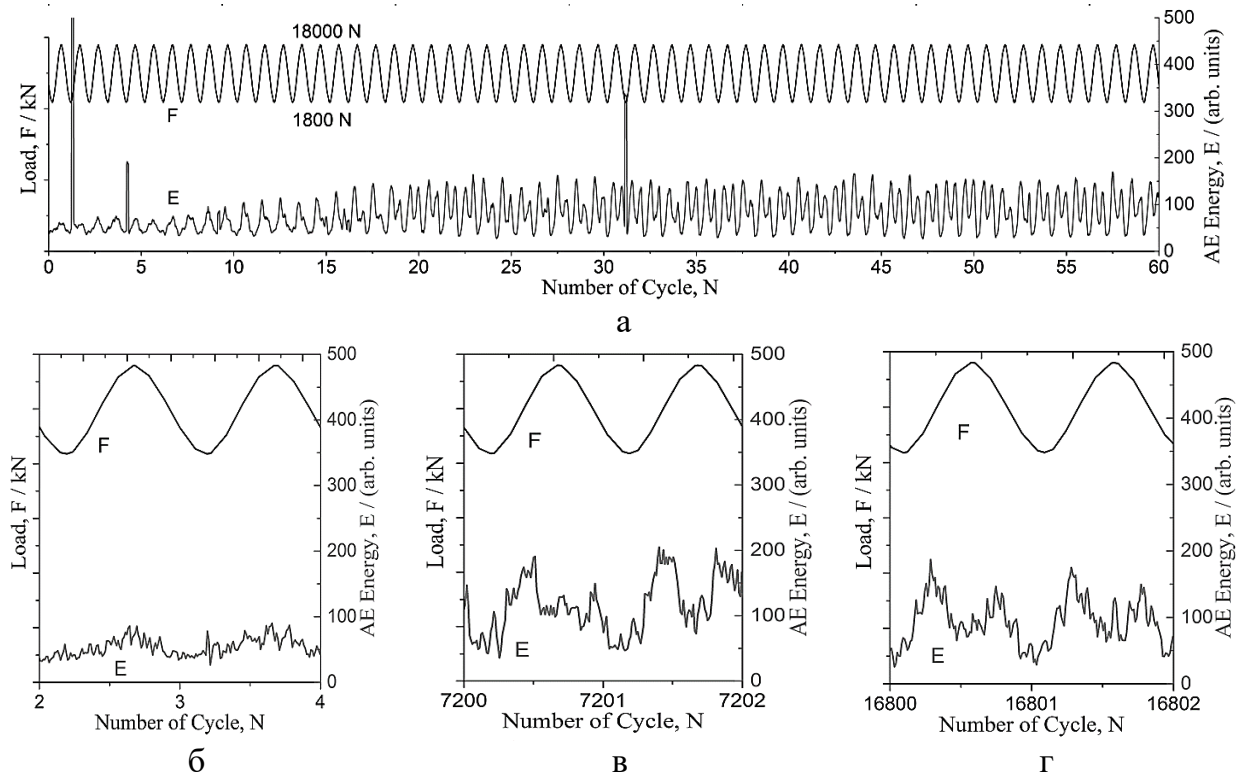


Рисунок 5.14 – Общий характер изменения энергии АЭ (E) при испытании стали при комнатной температуре, где: а – общий вид на начальном этапе испытания, б, в и г – детализация записи АЭ по 2 цикла в начале, середине испытания и перед разрушением соответственно, F – кривая изменения нагрузки

3). Во всех испытаниях АЭ изменяется синхронно с циклом нагружения, то есть наблюдается ее различимая циклическая повторяемость в изменении амплитуды сигналов и параметров, рассчитываемых по ней: среднеквадратичное значение сигнала, энергия, медианная частота и т.д. При этом во всех испытаниях с ростом трещины наблюдается разделение в циклах АЭ от одиночного пика на двойной и устойчивый рост второго пика по мере приближения к разрушению (рисунок 5.14), что должно быть ощутимым изменением при сравнении степени подобия, как кадров, так и циклов изменения параметров АЭ, рассчитанных по ним.

4). Во всех испытаниях при приближении к разрушению энергия АЭ в цикле нагружения возрастала со сдвигом функции спектральной плотности в область низких частот (уменьшением медианной частоты), что подтверждает работоспособность параметров, выбранных для оценки степени опасности в п. 3.7 Главы 3. При этом с приближением к моменту разрушения средний уровень медианной частоты непрерывно

убывает. В качестве примера, на рисунке 5.15 приведены данные по изменению нормированной на начало испытаний медианной частоты сигналов АЭ для усталостных испытаний стальных образцов при комнатной температуре и 233 К.

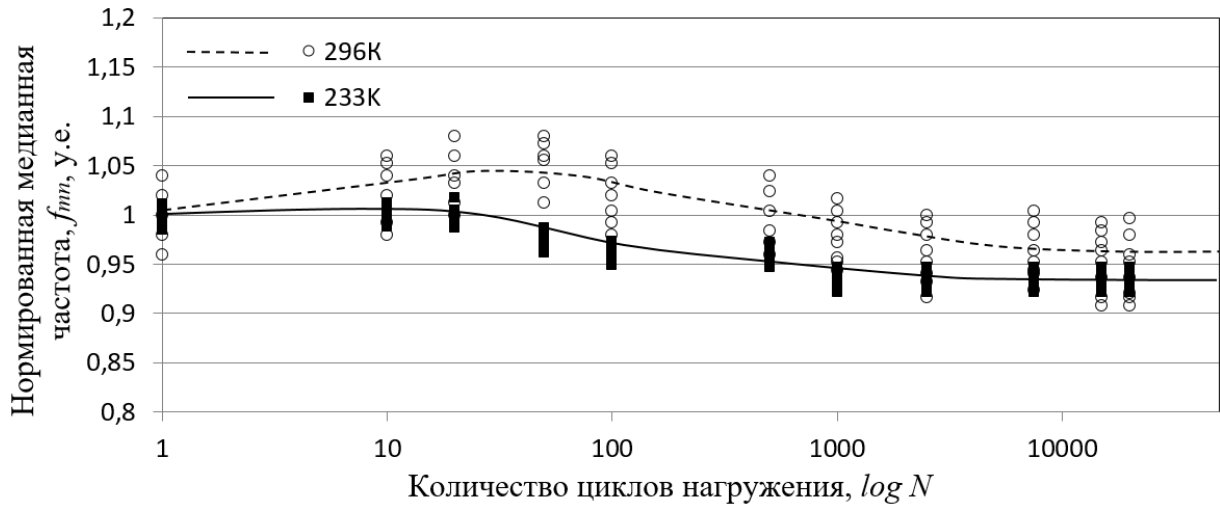


Рисунок 5.15 – Пример изменения средней нормированной медианной частоты сигналов АЭ за цикл нагружения в усталостных испытаниях образцов при температурах 296 и 233 К

5). Полученные результаты также показали, что зарождение и развитие усталостных трещин существенно легче при положительных температурах, чем при отрицательных. Данный факт свидетельствует о том, что на реальных объектах зарождение усталостных трещин, скорее всего, происходит в летний период, а их внезапное развитие (долом) – в зимний. То есть низкая температура эксплуатации не является определяющим фактором для катастрофического разрушения, а лишь приближает время его наступления. Данный факт следует иметь в виду при анализе АЭ регистрируемой мониторинговыми системами в летний и зимний период при контроле объектов работающих в условиях циклических нагрузок.

6). Обозначенная выше эволюция изменения АЭ за цикл нагружения обнаруживается начиная с 15 ± 10 циклов нагружения (рисунок 5.14). При этом датчик раскрытия трещины показал результат увеличения среднего значения длины трещины выше его погрешности начиная с 476 ± 114 циклов нагружения (длина трещины $> 0,05$ мм). По распределению тепловых полей устойчиво признаки наличия трещины обнаруживаются начиная с 17190 ± 6138 циклов нагружения (длина трещины $> 0,9$ мм). Таким образом, использованными дополнительными средствами исследований не может быть подтвержден факт обнаружения трещины по АЭ на стадии ее зарождения. Однако полученные данные могут быть использованы для получения опорных данных для

настройки предлагаемого алгоритма и оценки вероятности обнаружения трещины на всех циклах, где длина трещины была более 0,05 - 1 мм.

На основании последнего и рисунка 5.11б следует, что имитация различных источников генерации АЭ при наличии трещины, выполненных по методу получения опорных данных корректны для выделения особенностей акустических сигналов, сопровождающих трение берегов. Общий вид АЭ, полученный при имитационных испытаниях, показан на рисунке 5.16. На нем видно, что на режиме $0,8F_{max}$ до и после смазывания АЭ существенно не отличается и по уровню сопоставима с АЭ, снятой с образца без выреза (рисунке 5.16а). При этом в местах цикла нагружения, установленных в работах [239, 240] (показаны стрелками на рисунке 5.16) АЭ до смазывания берегов трещины превышает АЭ после смазывания. Таким образом, можно принять, что АЭ на режиме $0,8F_{max}$ после смазывания отражает шум испытательной машины с образцом, имеющим вырез. Сопоставление АЭ на режиме $1,25F_{max}$ до и после смазывания в пределах времени цикла воздействия также показывает снижение АЭ на тех же временных метках (рисунок 5.16б). Сопоставление режимов $1,25F_{max}$ без смазывания берегов трещины и $0,8F_{max}$ после смазывания (рисунок 5.16в) наглядно показывает указанные отличия в АЭ в контрольных метках. Полученные данные также подтверждают выводы работ [3, 239, 240], в которых расчетно и экспериментально показано, что уровень сигнала АЭ при росте трещины в стали настолько мал, что при пороговом методе регистрации слежение за развитием трещины возможно наблюдать только по двум энергичным сигналам АЭ не совпадающих с пиком изменения нагрузки (рисунок 5.14 и 5.16). При этом наличие двух пиков АЭ и их положение (рисунки 5.12 – 5.14) также совпадает с данными обозначенных работ, а именно с моментом раскрытия трещины при увеличении напряжения в цикле и моментом закрытия трещины на обратном ходе. Эти же работы показывают, что трение берегов, хоть и в меньшей степени (не на всю длину трещин), происходит и в знакопостоянных циклах. Наличие «провала» АЭ между высокоамплитудными пиками в цикле – не что иное, как возврат АЭ к общему уровню акустического шума цикла, который увеличивается и уменьшается синхронно с ним.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют об очень малой величине приращения трещины за цикл нагружения. Однако они показывают возможность ее обнаружения методом АЭ задолго до разрушения образцов по трению берегов, что подтверждает применимость метода для диагностики повреждаемости материалов в условиях циклического нагружения. При этом установлено, что наибольшей чувствительностью обладают параметры: энергия (E), медианная частота (f_{med}) и формы

кривых их изменения за цикл нагружения. Следовательно, для решения задачи мониторинга процессов зарождения и развития трещины по параметрам АЭ может быть применен предлагаемый метод иерархического анализа шумоподобной АЭ, но перед его апробацией необходимо исследовать работоспособность предложенных в п. 3.7 Главы 3 критериев оценки степени опасности.

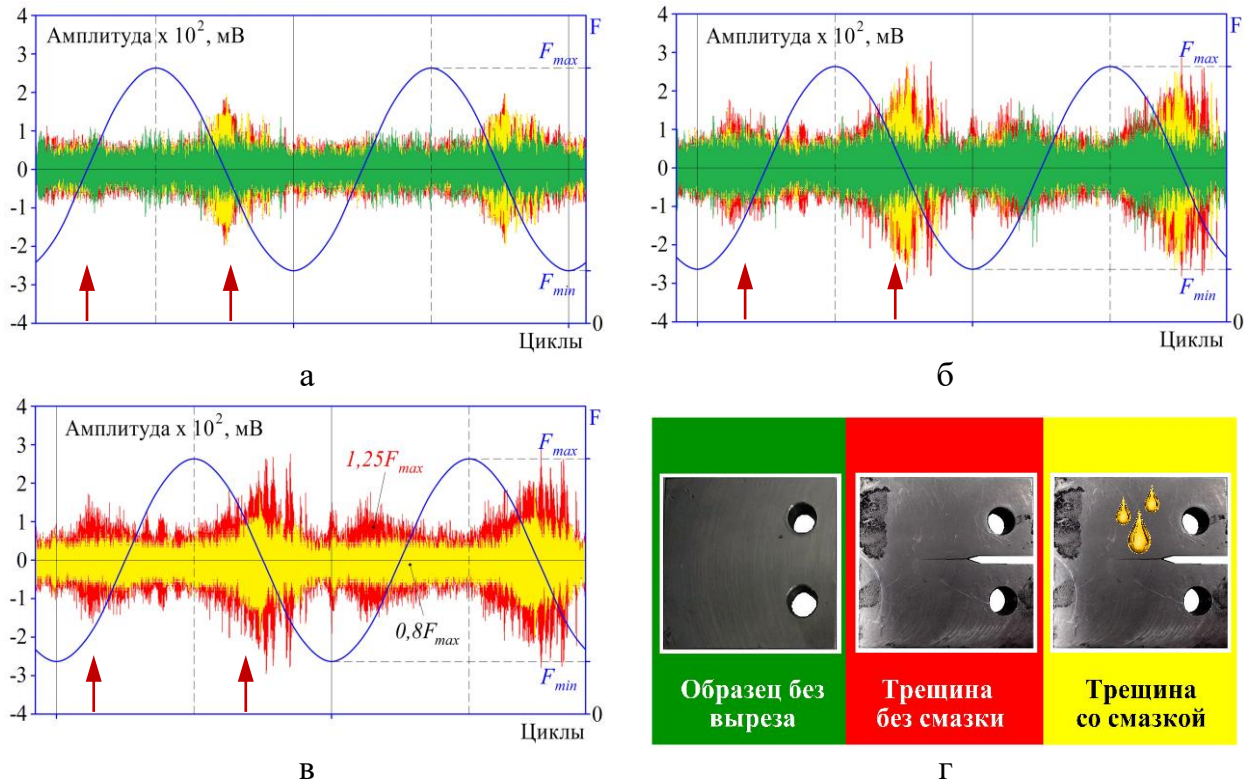


Рисунок 5.16 – Общий вид АЭ, сопровождающий циклы нагружения образца при нагрузке $0,8F_{max}$ (а), $1,25F_{max}$ (б) и обеих нагрузках (в), где цвет графика соответствует условиям испытаний и расшифрованы на рисунке (г).

5.3.2. Результаты исследований

В данном случае применение метода оценки шумоподобной АЭ, приведенного в п. 2.4 Главы 2, основывалось на описанных выше экспериментальных фактах испытаний и была реализована следующим образом. На первом уровне для выявления факта наличия повреждения материала в условиях циклического нагружения достаточно обнаружить более высокоамплитудные сигналы от трения берегов трещины. Как показано выше данные сигналы являются параметрически выделяющимися и известно их временное положение в цикле нагружения, а потому для их обнаружения в беспороговом режиме возможно настроить все способы кластеризации, приведенные в п. 3.6 Главы 3. Однако учитывая, что алгоритм сортировки кадров АЭ по изменению скорости и дисперсии RMS (КЗ, п. 4.3.2.3) из всех рассмотренных обладает самым быстрым счетом, при самом

минимальном затрата вычислительных ресурсов, именно он был выбран в качестве основного. В результате нескольких итераций были найдены такие настроечные параметры схемы обработки « $F1+f_I+K3$ », которые удовлетворяли условиям (i)–(iii) п. 5.2.4, т.е. позволили бы во всех усталостных испытаниях устойчиво выделить сигналы в моменты трения берегов трещины. Пример получаемых результатов представлен на рисунке 5.17, где сигналы кластера совпадающего с признаками трения берегов трещины выделены знаком «■». Таким образом, появление сигналов ■-типа можно считать признаком трещины, поэтому приняв на I уровне обработки класс опасности «0» до момента регистрации этого типа сигналов, а при их обнаружении класс «IV» получаем хронологическую ленту изменения класса опасности источника за время испытания (верхняя часть рисунка 5.17а).

На втором этапе обработки данных была проведена оценка работоспособности и сравнение эффективности разработанных: кластерно-энергетического и частотно-энергетического критериев, подробное описание которых приведено в п. 3.7 Главы 3. Обозначим здесь первый критерий, как критерий А, а второй – критерий Б. Как отмечено в обозначенных пунктах описания итогом предварительной работы является заполнение таблиц 3.5 и 3.6. Поэтому в данном разделе приводятся только классификационные таблицы соответствующих критериев и особенности их реализации. Общий характер распределений использующихся оценочных параметров представлен на рисунках 5.17б и 5.17в. При этом наибольшее отличие показали параметры: амплитуда, среднеквадратичное значение сигнала, энергия сигнала и медианная частота.

Из рисунков 5.17б и 5.17в видно, что на I уровне обработки без применения процедуры кластеризации АЭ данных по выбранным оценочным параметрам невозможно выделить кластер от трения берегов трещины. Между тем рисунки 5.12, 5.14 и 5.17а наглядно показывают, что сравнением подобия формы кривой изменения тех же оценочных параметров за цикл нагружения возможно установить: циклы нагружения без трещины (цикл 2-10 на рисунках 5.12, 5.14 и 5.17а); циклы с зарождающейся трещиной (циклы 20-20000 на рисунках 5.12, 5.14 и 5.17а) и циклы с растущей трещиной (рисунок 5.16б). Данный экспериментальный факт наблюдался и при повреждении других объектов циклического действия, поэтому и был положен в основу критериев оценки степени опасности АЭ на II уровне обработки, которые описаны в п. 3.7 Главы 3. Из вышеприведенных данных видно, что объем полученных экспериментальных данных позволяет сравнить разработанные критерии, что проводилось следующим образом.

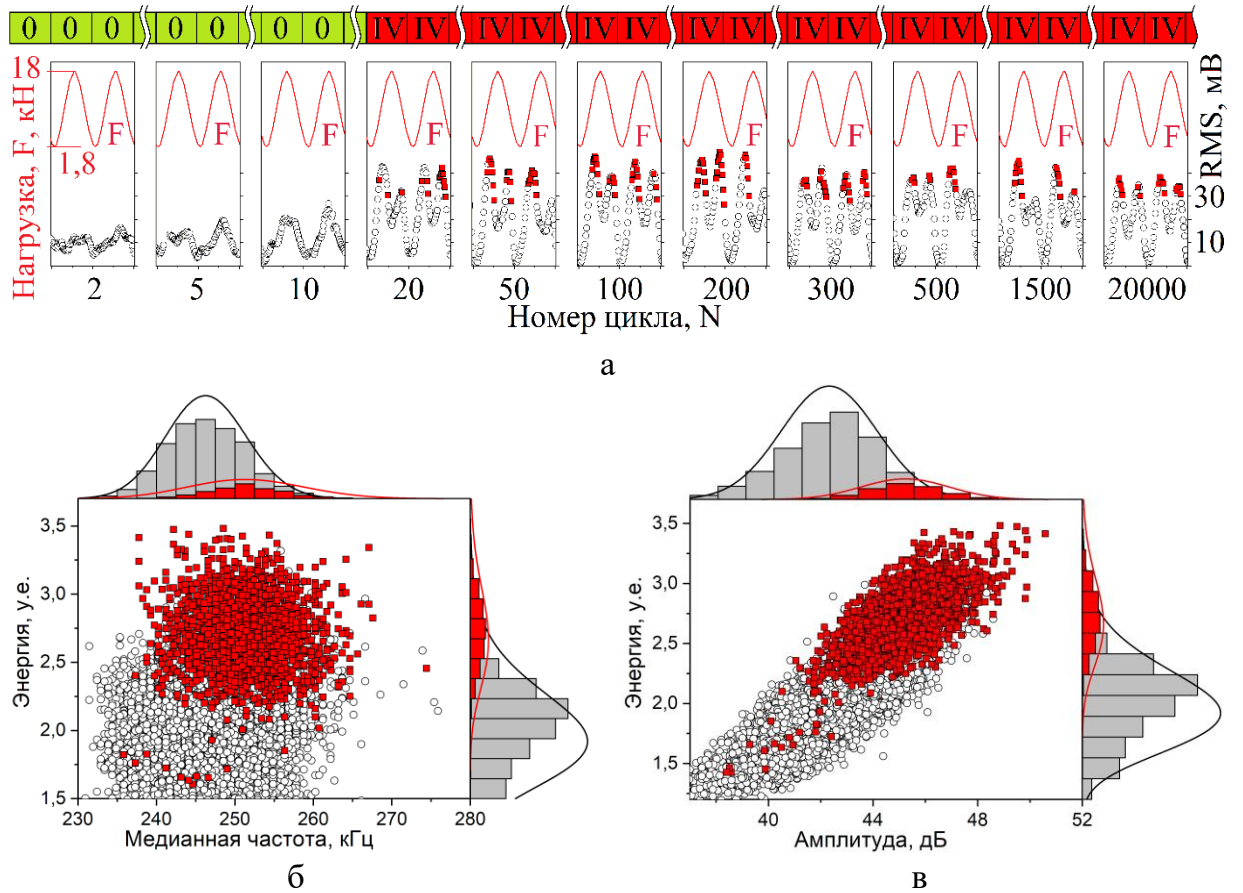


Рисунок 5.17 – Результаты кластеризации АЭ данных по схеме « $F1+f_l+K3$ » полученных при испытании стали 09Г2С с оценкой класса опасности (а) и фрагменты маргинальных гистограмм распределения основных оценочных параметров АЭ (б) и (в).

Критерий А - Кластерно-энергетический. После восстановления записи АЭ в хронологическом порядке по времени регистрации кадров с заменой значений амплитуд на значения энергии сигналов АЭ получали кривые изменения энергии сигналов АЭ за цикл. Далее они по времени регистрации синхронизировались с циклом нагружения и делились на выборки, равные длительности цикла с фиксированием времени его начала t_1 и конца t_2 . Таким образом, полная энергия АЭ за цикл нагружения E_C равна площади под кривой изменения энергии сигналов АЭ $E_i(t)$, заключенной между метками t_1 и t_2 , т.е.:

$$E_C = \int_{t_1}^{t_2} E_i(t) \cdot dt, \quad (5.3)$$

Далее проводилась кластеризация форм кривых изменения энергии АЭ за цикл нагружения. Однако, чтобы результаты статистического сравнения форм кривых изменения энергии АЭ не зависели от величины энергии АЭ в цикле E_C , а отображали только отличие формы, каждое значение $E_i(t)$ в цикле нормируется на полную энергию цикла E_C и, тем самым, получаем нормированные функции форм кривых изменения энергии АЭ в цикле $\tilde{E}(t)$, интегралы от которых по времени цикла равны единице:

$$\tilde{E}_C = E_i(t) / E_C, \quad (5.4)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} \tilde{E}_i(t) dt = 1. \quad (5.5)$$

Оценка подобия нормализованных форм кривых изменения энергии АЭ в цикле $\tilde{E}(t)$ выполнялась методом кластеризации АЭ-данных по алгоритму k -средних ($K2$), который описан в п. 4.3.2.2 Главы 4. Более подробная аналогичная процедура сравнения подобия кривых изменения параметров оценки АЭ показана в п. 6.2 Главы 6, поэтому здесь лишь отметим, что в результате нескольких итераций кластеризации данных усталостных испытаний необходимо было выделить три кластера:

- кластер c_1 - соответствующий циклам нагружения материала без трещины (форма АЭ цикла с одиночным пиком АЭ по центру цикла - цикл 2-10 на рисунках 5.12, 5.14 и 5.17а);

- кластер c_2 - соответствующий циклам нагружения материала, когда трещина зародилась, но еще не достигла критического размера (форма АЭ цикла со вторым пиком малого уровня - циклы 20-20000 на рисунках 5.12, 5.14 и 5.17а);

- кластер c_3 - соответствующий циклам нагружения материала с растущей трещиной (имеющей достаточное раскрытие для трения берегов) на стадии линейного роста или близкой к критическому значению (форма АЭ цикла со вторым пиком, близким по уровню с первым или превышающим его - рисунок 5.16б).

Вторым параметром кластерно-энергетического критерия (п. 3.7 Глава 3) является показатель приращения энергии в цикле Δe . Для которого по приведенным выше экспериментальным данным получены следующие значения. При отсутствии трещины $\Delta e < 0,25$. При наличии трещины, находящейся на начальной стадии развития (докритический размер трещины), Δe занимает значения $0,25 < \Delta e < 1$. При нахождении трещины в стадии стабильного роста, что является критической ситуацией, размер энергии в цикле максимальный и $\Delta e > 1$. Таким образом для кластерно-энергетического критерия получаем значения параметров классификации, сведенные в таблицу 5.4.

Таблица 5.4

группа цикла по форме кривой АЭ	энергетический коэффициент, Δe		
	$\Delta e < 0,25$	$0,25 < \Delta e < 1$	$\Delta e > 1$
c_1	0	I	II
c_2	II	III	IV
c_3	III	IV	IV

Критерий Б - Частотно-Энергетический. Параметрами классификации в данном критерии являются энергетический (k_E) и частотный (k_f) коэффициенты. При этом, как

показано в п. 3.7 Главы 3, перед составлением классификационной таблицы критерия в предварительных работах необходимо установить соответствие соотношений между k_E и k_f различным этапам повреждения материала. В результате анализа вышеприведенных данных были определены соотношения, соответствующие этапам повреждения, удовлетворяющие всем проведенным усталостным испытаниям (при комнатной и пониженной температуре), которые с описанием сведены в таблицу 5.6 и пояснены на рисунке 5.18. На основании анализа результатов испытаний, указанных в таблице 5.6 составлена классификационная таблица частотно-энергетического критерия, которая приведена в таблице 5.7.

Таблица 5.6

Вариант	Описание технического состояния объекта контроля
$k_E = 1, k_f = 1$	поведение E и f_m не изменяется, т.е. оба параметра остаются на своих начальных уровнях. Вариант является признаком отсутствия в материале трещины, либо нахождение ее на начальной (инкубационной) стадии, поэтому здесь ранг опасности не присваивается (т.е. «0»);
$k_E = 1, k_f > 1$	увеличение f_m при неизменном начальном уровне E наблюдается на стадии зарождения трещины. Вариант соответствует действию источника малого масштабного уровня, существенно не влияющего на характеристики материала, поэтому здесь присваивается ранг активного источника АЭ;
$k_E = 1, k_f < 1$	неизменные или с малой величиной приращения по энергии АЭ сигналы начального уровня в сочетании с уменьшением f_m наблюдаются на стадиях предшествующих ускоренному (катастрофическому) развитию трещины. Вариант является критическим признаком возможного начала изменения технического состояния материала с последующим увеличением масштаба повреждения, поэтому здесь присваивается ранг критически активного источника АЭ;
$k_E > 1, k_f = 1$	рост E при положении f_m на уровне сопоставимом с начальным наблюдается на стадии линейного роста трещины, поэтому присваивается ранг критически активного источника АЭ;
$k_E > 1, k_f > 1$	параллельный рост E и f_m сопровождает стадию роста трещины начальной длины, поэтому данному варианту присваивается ранг критически активного источника АЭ;
$k_E > 1, k_f < 1$	увеличение E в сочетании со снижением f_m соответствует выявленным АЭ признакам приближения к разрушению образца, поэтому данному варианту присваиваем ранг критически активного источника АЭ;
$k_E < 1, k_f < 1$ $k_E < 1, k_f > 1$ $k_E < 1, k_f = 1$	варианты: параллельного снижения E и f_m ; роста f_m при снижении E и снижения E при неизменном уровне f_m во всех испытаниях не сопровождали ни этапы образования, ни роста трещины в материале при его циклическом нагружении. Данное поведение параметров свидетельствует о пассивном состоянии дефекта, поэтому им не присваивается ранг опасности (т.е. «0»).

Таблица 5.7

Частотный параметр	Энергетический параметр		
	$k_E < 1$	$k_E = 1$	$k_E > 1$
$k_f = 1$	0	0	III
$k_f > 1$	0	II	III
$k_f < 1$	0	IV	IV

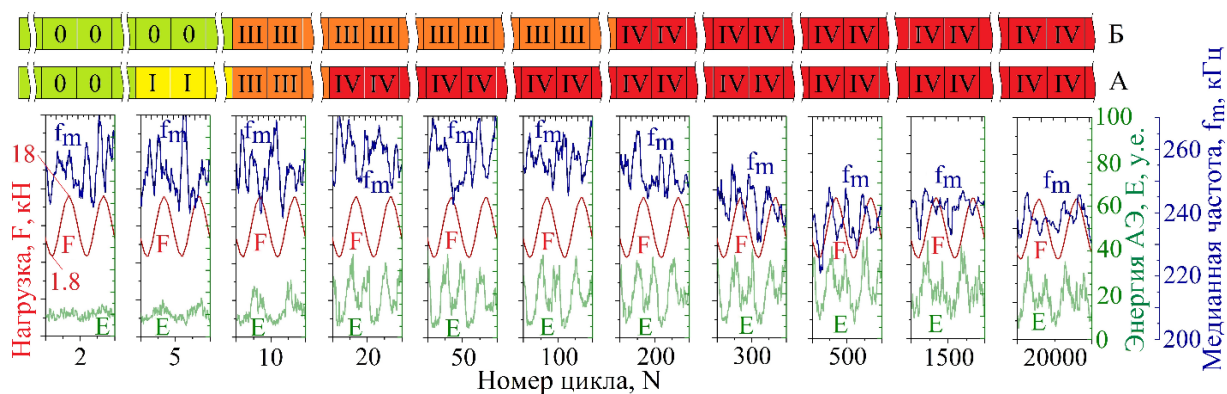


Рисунок 5.18 – Пример получаемых результатов с применением разработанных критериев применительно к анализу АЭ данных испытания, последовательно представленного на рисунках 5.12, 5.14, 5.15 и 5.17. Цветные квадраты выше диаграмм АЭ иллюстрируют процедуры присвоения ранга опасности циклам на основе предложенных критериев.

Для примера в верхней части рисунка 5.18 приведены в виде хронологических лент итоги классификации одного из испытаний по кластерно-энергетическому критерию (лента А) и частотно-энергетическому критерию (лента Б). Из которого видно, что результаты оценки класса опасности источника по критериям А и Б показали высокую чувствительность обоих критериев, как к процессу зарождения трещины, так и к переходу на стадию устойчивого роста трещины.

Сопоставление полученных результатов на третьем уровне обработке данных представлено на рисунке 5.19. Где, учитывая, что на химическом, нефтехимическом и нефтеперерабатывающем оборудовании запрещены трещины всех видов и направлений, то при появлении АЭ признаков трещины устанавливается IV класс опасности источника АЭ (таблицы 5.5 – 5.7). Однако принимая во внимание, что АЭ признаки трещины на I и II уровне анализа выявляются заблаговременно, то появление IV класса опасности источника АЭ на двух уровнях анализа принимаем за критическую точку эксплуатации материала. При этом на третьем уровне обработке для исключения ложного срабатывания АЭ системы факт обнаружения трещины устанавливается при одновременном присвоении источнику АЭ IV класса опасности на двух предыдущих уровнях обработки. Тогда из рисунков 5.17, 5.18 и 5.19 следует, что при использовании критерия А

обнаружение трещины на первом уровне будет тут же подтверждено на втором уровне обработке, а критерием Б только через 180 циклов.

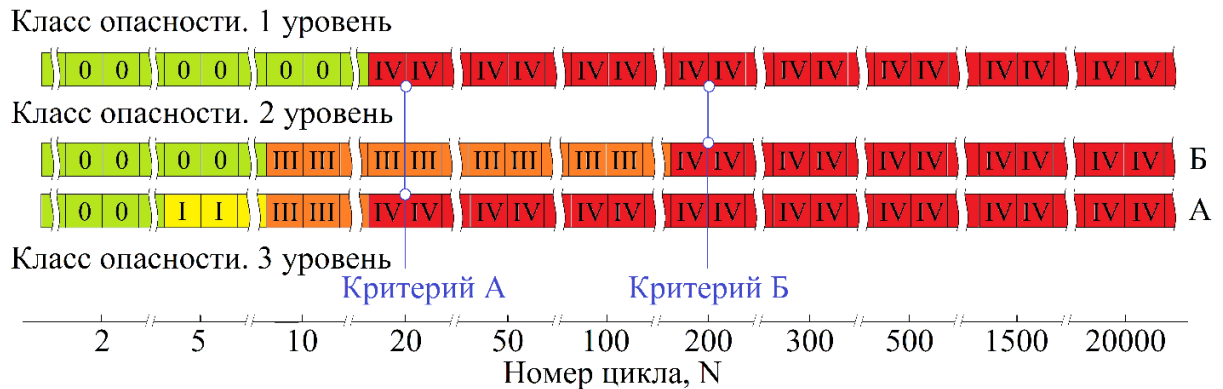


Рисунок 5.19 – Пример сопоставления результатов анализа АЭ первого уровня (рисунок 5.17) и второго уровня (рисунок 5.18) по третьем уровне по каждому АЭ критерию

Из полученных результатов видно, что критерий Б демонстрирует меньшую чувствительность при оценке активности источника АЭ на стадии зарождения трещины, что приводит к более позднему моменту выявления стадии роста трещины, по сравнению с критерием А (в среднем на 80 ± 43 циклов). Кроме этого критерий Б чувствителен к изменению состояния всей механической системы машина-образец из-за роста дефекта в материале образца (переход на IV опасности в момент существенного уменьшения рабочего сечения образца), поэтому детально отображает критическую поврежденность силового элемента – т.е. образца. При этом аналогов разработанному критерию, отображающему изменение степени поврежденности силового (несущего) элемента при наличии в нем дефекта, нам не известны. Также критерий Б изначально задумывался как критерий более быстрого счета по сравнению с А, поэтому имеет более простой математический аппарат, и его реализация требует меньшей вычислительной мощности. Однако критерий А более универсален и может быть адаптирован под любую форму кривой изменения энергии АЭ. Для этого достаточно переназначить положение центроидов кластеров (c_1, c_2, c_3).

Кроме этого установлено, что критерии А и Б не чувствительны к высокоамплитудным сигналам (импульсным сигналам) отдельных единичных АЭ событий, а также помехам, т.к. использование интегрального подхода (осреднение параметров) позволяет сгладить влияние случайных единичных событий. Однако следует также иметь в виду, что выбор АЭ критерия для конкретной реализации должен определяться задачей применения (выявления зарождения трещины, определение стадии

процесса трещинообразования или оценка поврежденности конструкции) и производительности АЭ системы.

Из вышесказанного видно, что в данном практическом примере подтверждена, как работоспособность АЭ критериев, предложенных в п. 3.7 Главы 3, так и метод III-х уровневой обнаружения и верификации факта наличия дефекта в материале работающего в условиях циклического изменения нагрузки. Таким образом, предлагаемый метод анализа шумоподобной АЭ показал свою пригодность для данного направления применения. Все основные результаты, полученные в рамках обозначенной задачи, обсуждались на профильных конференциях [А39, А40, А47, А49] и подробно освещены в следующих изданиях [А3, А17, А18, А28]. Кроме того, полученные результаты исследований подтвердили оригинальность и работоспособность разработанного способа обработки данных при циклическом изменении нагрузок, поэтому он в общем виде был запатентован (Приложение Е).

Выводы по главе 5

1. Проведено экспериментальное сравнение пяти частотно-временных преобразований и установлено, что на сегодня для анализа шумоподобной АЭ в наибольшей степени подходит Фурье-преобразование с непрерывным покадровым способом расчета СПМ методом периодограмм Уэлча. При этом для получения лучшего частотного разрешения необходимо максимально увеличить частоту дискретизации АЭ данных при фиксированной длине кадра.
2. Экспериментально показано, что применение даже щадящих алгоритмов шумопонижения может привести к негативному результату работы алгоритмов разделения (классификации, кластеризации) АЭ данных. Разработана модификация спектральных алгоритмов шумопонижения, отличающаяся тем, что используются функции коррекции фильтров специального вида, позволяющие снизить влияние не исследуемых процессов или искажений от аппаратуры на результат классификации шумоподобной АЭ.
3. Исследовано восемнадцать вариантов сочетаний применения выбранных схем шумопонижения и разделения непрерывных АЭ данных и установлены три схемы, подходящие для реализации, при апробации предлагаемого беспорогового иерархического метода обработки шумоподобной АЭ для решения реальных практических задач.

4. Подробно исследованы АЭ признаки трех режимов трения и изнашивания узлов скольжения и выделены наиболее чувствительные параметры их оценки для реализации в предлагаемом иерархическом методе анализа шумоподобной АЭ.
5. Исследована АЭ при циклическом нагружении материала с трещиной и выделены наиболее чувствительные параметры её оценки для реализации в предлагаемом иерархическом методе анализа шумоподобной АЭ.
6. Экспериментально оценена работоспособность разработанных кластерно-энергетического и частотно-энергетического критериев для оценки перехода вязкого материала в критическое состояние в условиях его циклического нагружения, а также проведено сравнение их эффективности между собой.

Глава 6. Исследование возможности применения разработанного иерархического метода для решения практических задач

6.1. Определение критических точек и восстановление хронологии разрушения узлов трения-скольжения по акустической эмиссии на примере лабораторных трибологических испытаний

Одним из важнейших эксплуатационных качеств существующих и перспективных материалов является износостойкость, которая исследуется при различных условиях трения и изнашивания материалов. Сегодня основным способом определения трибологических характеристик материалов и их подбор для конкретных условий эксплуатации остается испытание на различных по виду машинах трения, моделирующих эти условия с разным уровнем приближения (детализации) [244, 245]. Среди экспериментальных задач, решаемых на машинах трения, особое место занимает задача по установлению «критических точек», которые применительно к проблемам трения и изнашивания материалов представляют собой перегибы (существенное изменение абсолютного значения производной) на кривой интенсивности изнашивания (износа от времени) и показывают переход режима работы узла трения от одних условий контактного взаимодействия (доминирующего механизма изнашивания) к другим [152, 246-248]. Необходимость определения и исследования критических точек (КТ) состоит в том, что они определяют переходные режимы работы узла трения, при которых может произойти либо его катастрофическое изнашивание и выход из строя, либо, наоборот, – оптимизация условий трения со снижением интенсивности (скорости) изнашивания [152, 245, 246, 247, 248 и др.].

В работе [247] отмечается, что при трении и изнашивании основными являются КТ, связанные с: переходом от упругой деформации поверхности к пластической или разрушению; переходом от пластического оттеснения материала поверхности к его микрорезанию или задиру; разрушением адсорбционной плёнки; формированием или разрушением хемосорбционной плёнки (химического соединения); разрыхлением (изменением структуры) поверхностного слоя трения или размягчением зоны трения, приводящих к повреждению материала или его намазыванию на контртело. Таким образом, отслеживание и идентификация механизмов повреждения в окрестности КТ помимо исследовательского интереса имеет существенные диагностические перспективы, т.к. может позволить непосредственно во время эксплуатации: провести корректировку режима работы узла трения для снижения интенсивности его изнашивания; предотвратить или снизить масштаб разрушения узла трения в КТ, а также

установить причины возникновения катастрофической КТ или разрушения узла трения. Однако, чтобы достигнуть озвученное, необходимы методы и средства, позволяющие в режиме работы узла трения (без его остановки и разборки) обнаруживать и идентифицировать КТ с доминирующим механизмом повреждения. В связи с этим, было решено апробировать предлагаемый метод анализа шумоподобной АЭ для решения обозначенной задачи на серии специальных испытаний смазочных материалов, проведенных на четырехшариковой машине трения.

Описание условий испытаний, особенности узла трения, смазочных и контактирующих материалов, а также записи АЭ приведено в п. 4.1.2 Главы 4. В исследованиях использовались опорные данные и алгоритмы анализа АЭ, описание которых приведено в п. 5.2 Главы 5. Здесь лишь выделим, что в качестве опорных данных использовались средние кривые АЭ кластеров основных механизмов трения и изнашивания, установленных для данной машины трения (т.е. сигналы АЭ: \circ -типа соответствуют кластеру абразивного износа; \blacktriangle -типа – адгезионному износу со схватыванием в отдельных точках, а \blacksquare -типа – адгезионному износу с отеснением металла (присущего схватыванию по площади и задиру узла трения) по схеме обработки АЭ « $F1+fI+KI$ » при $[R\text{-квadrat}] \geq 0,85$ и АЭ-признаки КТ, полученные для параметров a_{es} и a_{rms} . Как было сказано в п. 5.2 Главы 5, контрольная выборка для установления границ диагностических признаков (АЭ-признаков КТ) состояла из 18 испытаний, а общий массив имитаций АЭ, который применялся для расчета вероятностей установки диагнозов D_1 , D_2 и D_3 , состоял из 132 испытаний. В них входили 20 имитаций АЭ при нормальном (линейном) режиме изнашивания (диагноз D_1), 50 – при изнашивании со схватыванием в отдельных областях (диагноз D_2) и 62 – при задирах поверхностей трения с пластическим отеснением материала (диагноз D_3). Соответственно переходя по этим данным к априорным вероятностям возникновения соответствующих событий имеем $P(D_1) = 0,15$, $P(D_2) = 0,38$ и $P(D_3) = 0,47$. Установленные в п. 5.2 Главы 5 диагностические признаки, их величины и априорная вероятность их наблюдения в данной серии имитационных испытаний по I и II уровню обработки АЭ сведены в диагностические матрицы метода Байеса (таблицы 6.1 и 6.2).

Согласно предлагаемому методу (п. 2.4 Глава 2) в диагностическую матрицу III уровня (таблица 6.3) должны войти апостериорные вероятности диагнозов D_1 , D_2 и D_3 , установленных на первых двух уровнях, и диагностические признаки III уровня. Последние описаны в таблице 6.3, поэтому остановимся подробнее на выходных данных из таблиц 6.1 и 6.2, которые там не разъяснены.

Таблица 6.1

Диагноз $I.D_i$	Контрольные параметры I уровня обработки										$P(D_i)$	
	P, H		- ▲ -		- ■ -		$f_{med}, \kappa\Gamma\zeta$			$W_{eff}, y.e.$		
	$<0,6P_k$	$\geq 0,6P_k$	+	-	+	-	<62	$62...68$	>68	<20		≥ 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 ($i = 1...3$) 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 [210] – таблица 4.1; ▲ и ■ – тип кластера по степени схожести экспериментальных кривых СПМ опорным при $[R\text{-квадрат}] \geq 0,85$; «+»/«-» - присутствие/отсутствие кластера на временном отрезке оценки класса опасности; f_{med} и W_{eff} – медианная частота и эффективная ширина СПМ (рис. 5.9).

Таблица 6.2

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 6.1.

При проведении исследований в п. 5.2 Главы 5 показано, что критическое повреждение узла трения возникает при задире (диагноз D_3), а режим трения со

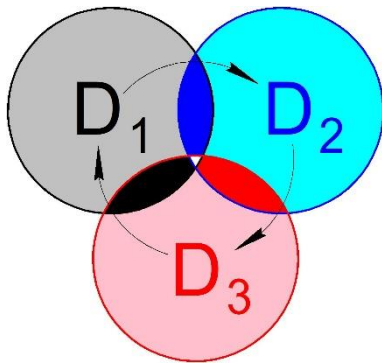


Рисунок 6.1 – Схема вероятности наступления диагнозов при трибологических

схватыванием в отдельных точках (диагноз D_2) является переходным режимом от нормального режима трения (диагноз D_1) к задиру. При этом диагноз D_2 , в крайнем случае D_3 , необходимо установить, как можно, на более ранней стадии, чтобы было время для выполнения компенсирующих мероприятий с целью недопущения задира. Процесс трения с изнашиванием является циклическим самоорганизующимся процессом, при котором вероятность наступления обозначенных диагнозов можно описать схемой, показанной на рисунке 6.1. На ней раннему подтверждению диагнозов

D_2 и D_3 на III уровне обработки данных будут соответствовать тёмно-синяя и тёмно-красная области соответственно. На основании тех же исследований п. 5.2 Главы 5 имеем, что раннее подтверждение диагноза D_2 на I уровне обработки возможно при следующих

значениях диагностических признаков: [$P < 0,6P_k$, $\blacktriangle = \langle + \rangle$ и $\blacksquare = \langle - \rangle$ (что означает: имеются / не имеются сигналы соответствующего кластера), $f_{med} > 68$ 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]. Данные значения приняты для реализации в предлагаемом методе для анализа данных, полученных на ЧШМ, и подразумеваются в таблице 6.3 под обозначениями $I.D_2$ и $II.D_2$ соответственно. Далее, применяя обобщенную формулу Байеса, получаем апостериорные для I и II уровня, и априорные для III уровня анализа вероятности диагнозов D_1 , D_2 и D_3 : $P(D_1/I.D_2) = 0,25$; $P(D_2/I.D_2) = 0,74$, $P(D_3/I.D_2) = 0,01$ и $P(D_1/II.D_2) = 0,73$, $P(D_2/II.D_2) = 0,24$; $P(D_3/II.D_2) = 0,03$. Данные значения соответствуют вероятности обнаружения диагнозов D_1 , D_2 и D_3 на соответствующем уровне анализа при принятых уровнях диагностических признаков, поэтому в таблице 6.3 отмечены знаком «+», а в колонке «-» - соответственно вероятность пропуска, что равно: $1 - P(D_1/I.D_2)$; $1 - P(D_2/I.D_2)$ и т.д. При этом понятно, что для диагноза D_2 на I уровне анализа величина $P(D_2/I.D_2)$ – является вероятностью правильного обнаружения события, а $P(D_1/I.D_2) + P(D_3/I.D_2)$ – вероятностью ошибки, что справедливо и для II уровня анализа.

Таблица 6.3

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 (рисунок 5.4); остальные обозначения, как в таблице 6.1 и 6.2.

Аналогичным образом для диагноза D_3 получаем априорные вероятности раннего обнаружения задира на I и II уровнях анализа, который согласно п. 5.2 Главы 5 возможен при следующих величинах диагностических признаков: [$P \geq 0,6P_k$, $\blacktriangle = \langle + \rangle$, $\blacksquare = \langle + \rangle$, $f_{med} < 62$ 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]. Данные значения приняты для реализации в предлагаемом методе анализа данных, полученных на ЧШМ, и подразумеваются в таблице 6.3 под обозначениями $I.D_3$ и $II.D_3$.

Итоговая диагностическая матрица (таблица 6.3) позволяет определить апостериорные вероятности не только для оценки эффективности предлагаемого метода, но и провести сравнение с амплитудным пороговым методом. Последний по возможности раннего обнаружения режима трения со схватыванием (диагноз D_2) близок к варианту $P(D_2/II.D_2) = 0,24$, а по раннему обнаружению задира (диагноз D_3) варианту $P(D_3/II.D_3) =$

0,94. Корректность данного приближения обуславливается высоким уровнем корреляции между изменением параметра амплитуды АЭ и рассчитываемого по ней параметра огибающей АЭ, который использован в данной работе. На III уровне в соответствии с результатами п. 5.2 Главы 5 вероятность раннего обнаружения диагноза D_2 определяют следующие значения диагностических параметров [$I.D_2 = \langle + \rangle$; $I.D_3 = \langle - \rangle$; $II.D_2 = \langle + \rangle$; $II.D_3 = \langle - \rangle$; $E_c \blacktriangle / t = 2 \dots 3,8$; $E_c \blacksquare / t < 3,8$], а раннего обнаружения диагноза D_3 : [$I.D_2 = \langle + \rangle$; $I.D_3 = \langle + \rangle$; $II.D_2 = \langle + \rangle$; $II.D_3 = \langle + \rangle$; $E_c \blacktriangle / t \geq 3,8$; $E_c \blacksquare / t \geq 3,8$]. Применяя обобщенную формулу Байеса получаем соответствующие значения апостериорных вероятностей установления диагнозов D_2 и D_3 на III уровне предлагаемого метода: $P(D_2/III.D_2) = 0,73$ и $P(D_3/III.D_3) = 0,87$. Таким образом, предлагаемый метод по сравнению с амплитудным пороговым подходом позволил 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).

Результаты данных исследований были апробированы для решения ряда однотипных практических задач на трех машинах трения, описание которых и условия испытаний на них приведены в п. 4.1.2 Главы 4. Однако, учитывая, что в диссертационной работе основной материал рассмотрен на примере испытаний на четырехшариковой машине трения, то она же используется далее для демонстрации примеров возможных направлений применения предлагаемого метода. Также, на основании общности полученных результатов разделения АЭ на кластеры в испытаниях на различных машинах трения и контактных материалов, мы полагаем, что полученные результаты переносимы и на другие схемы испытаний узлов трения, т.е. не ограничивается какой-либо конкретной схемой трибоиспытаний или используемыми контактными и смазочными материалами. При получении демонстрируемых далее результатов на всех трех уровнях анализа задавались логические условия принятия решения и величины контрольных параметров в соответствии с таблицами 6.1-6.3.

Задача 1. Оценка результатов серии одинаковых сравнительных испытаний разных смазочных или контактирующих материалов, по окончании которых формируются повреждения одинакового вида и размера (рисунок 6.2), т.е. когда требуется ответить на вопрос: одинаково ли работали различные смазочные/контактирующие материалы и одинакова ли стадийность разрушения контактных поверхностей?

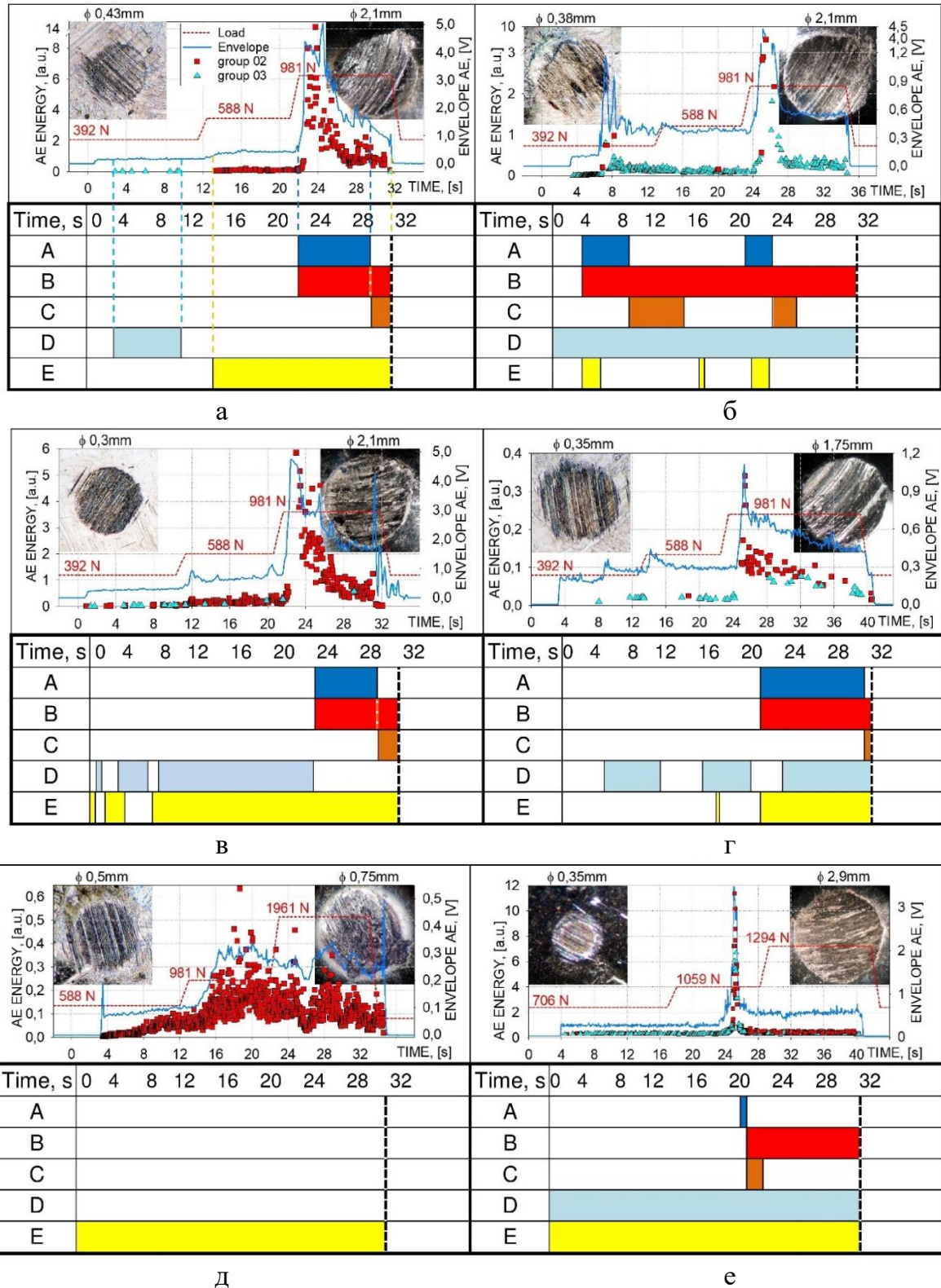


Рисунок 6.2 – Результаты обработки данных специальных испытаний на ЧМТ-1 (таблица 4.3) с применением предлагаемого подхода оценки спектрально-временного подобия АЭ (верхняя часть) и составленные по ним кластерно-временные хронологические карты (нижняя часть), полученные для условий смазывания: (а) L2, (б) L4, (в) L3, (г) L5, (д) L6, (е) L1.

На момент окончания трибоиспытания пятно износа успеваает затереться и по нему невозможно: установить условия, при которых смазка не обеспечила защитные свойства; установить стадийность накопления повреждений поверхностями трения; установить доминирующие механизмы изнашивания и время их проявления, а значит только по пятну повреждения (износу) невозможно адекватно сравнить варианты испытаний.

Примером такой неоднозначности являются специальные испытания смазочных материалов L2, L4 и L3, представленные на рисунках 6.2а, 6.2б и 6.2в, в результате которых получен одинаковый размер повреждения равный $\varnothing 2,1$ мм (микрофотографии на правой верхней части рисунков), что является трибологическим признаком одинаковой работоспособности этих смазочных материалов. Однако, судя по АЭ данным – это далеко не так. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Результаты I уровня анализа специальных испытаний представлены на рисунках 6.2 в верхней части в виде времени проявления источника каждого вида. Также в верхней части на левой и правой сторонах рисунка представлены микрофотографии, иллюстрирующие пятно износа по каждому смазочному материалу до и после задира. На II уровне результаты получены путем сравнения подобия АЭ кривых изменения параметра a_{es} за цикл (оборот) работы узла трения с опорными АЭ признаками КТ. Итоговая кривая изменения a_{es} показана в фоновом режиме на рисунках 6.2 в верхней части. По требованию представителей ОАО «АвтоВАЗ» для обеспечения возможности контроля результатов и легкости сравнения на III этапе обработки АЭ по условиям, приведенным в таблицах 6.1-6.3, строились кластерно-временные хронологические карты, которые приведены в нижней части этих же рисунков.

Пример построения хронологических карты на III уровне по данным I и II уровня детально представлен на рисунке 6.2а, из которого видно, что карта строится путем закрашивания её соответствующей строки синхронно с проявлением соответствующего АЭ признака. При этом наличие цвета в каждой строке соответствует проявлению АЭ признака, т.е. логическому значению «1», а отсутствие, соответственно, «0».

Из таблиц 6.1 и 6.2 и рисунков 6.2 видно, что, по сути, строка «А» отображает начало и продолжительность задира и строится по всем условиям диагноза D_3 . Строка «В» – момент времени, в который диаметр пятна контакта превысил допустимое значение $D > [D]$ (для данного случая критерий критического повреждения по [210]). Поскольку пятно контакта после задира не может уменьшиться в размерах, то строка «В» заполняется от момента первого установления диагноза D_3 по строке «А» и до конца испытания. Строка «С» – время приработки узла трения после задира. Заполняется

каждый раз после установления диагноза D_3 по строке «А» от временной метки, соответствующей условию [$I.D_2 = \langle + \rangle$; $I.D_3 = \langle + \rangle$; $II.D_2 = \langle - \rangle$; $II.D_3 = \langle - \rangle$; $E_c \blacktriangle / t = < 3,8$; $E_c \blacksquare / t < 3,8$] до временной метки с условием [$\bar{U} < 0,45B$; $\Delta \bar{U} < 0,2B$]. Строка «D» и «E» – время действия каждого доминирующего механизма изнашивания по появлению сигналов АЭ соответственно типа \blacktriangle и \blacksquare (сигналы О-типа отражающие нормальный режим изнашивания не наносились, чтобы разгрузить рисунок без потери его информативности), которые заполняются при наступлении диагностических признаков $I.D_2 = \langle + \rangle$ и $I.D_3 = \langle + \rangle$, соответственно.

Сравнение испытаний трибоузла со смазочными материалами L2 и L4 по хронологическим картам, показывает (рисунки 6.2а и 6.2б), что L2 практически не допускает схватывания поверхностей трения на первом этапе нагружения (392 Н), т.е. режим изнашивания преимущественно абразивно-усталостный. При переходе на второй этап нагружения (588 Н) происходит пробой смазочного слоя, т.к. смазка допускает адгезионный износ по механизму пластического отеснением металла, но в микрообъемах (без задира). Полная потеря защитных свойств смазочным материалом L2 происходит на третьем этапе нагружения (981 Н), где наблюдаются АЭ признаки задира по механизму пластического отеснения макрослоя металла поверхностей трения. Из рисунка 6.2б видно, что при тех же условиях испытаний смазочный материал L4 допускает возникновение двух задиров (на нагрузке 392 Н и 981 Н). Кроме этого, практически с начала испытания и на всем его протяжении присутствуют АЭ признаки пробоя смазочного слоя со схватыванием поверхностей в разных точках и областях пятна контакта. Таким образом, полная потеря защитных свойств смазочным материалом L4 с задиром поверхностей происходит на первом этапе нагружения (392 Н), что, во-первых, критично, а, во-вторых, невозможно было установить без анализа АЭ. Также по АЭ признакам видно, что смазочный материал L3 (рисунок 6.2в) является аналогом L2, но на нагрузках ниже критической по задиру (981 Н) в большей степени допускает прорыв масляной пленки со схватыванием материала поверхностей в точках и малых областях со сдвигами микрообъемов материала.

Задача 2. Сокращение времени трибологических испытаний.

Большинство трибологических испытания – это достаточно длительные процедуры, поэтому сокращение времени их проведения является актуальной задачей. Проведенные лабораторные испытания с анализом АЭ показали, что используя предлагаемый подход анализа АЭ данных возможно сократить время трибоиспытаний за счет: (i) остановки испытания сразу при наступлении АЭ признака задира (сравнение вариантов проводится

по времени работы узла до задира при постоянной нагрузке или по величине достигнутой критической нагрузки трения при непрерывном нагружении узла трения); (ii) исключения операции визуального подтверждения износа или определения величины износа (подтверждение факта критического повреждения узла трения только по АЭ признакам) и (iii) сокращения количества уточняющих испытаний. Последнее можно продемонстрировать на примере испытаний на ЧМТ-1, показанном на рисунке 6.3, где приняты следующие обозначения: P_k и P_c – соответственно критическая нагрузка по задиру и нагрузка сваривания, полученная по стандартной методике [210]; P_k^{AE} и P_c^{AE} – соответственно те же критические нагрузки, но получаемые по АЭ данным следующим образом.

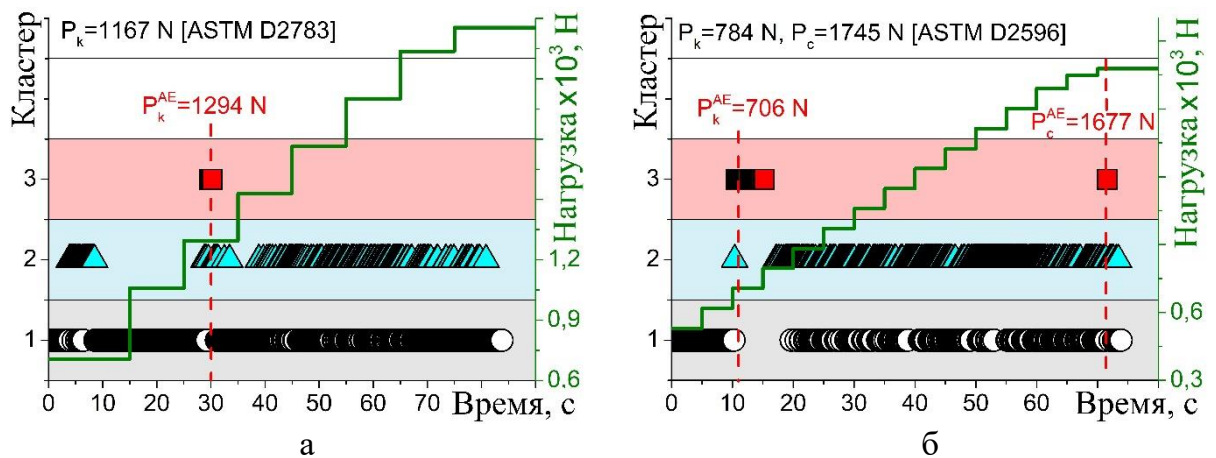


Рисунок 6.3 – Пример сокращения времени испытаний по методике [210] путем определения критической нагрузки P_k непрерывным нагружением узла трения с записью АЭ, где: а - моторное масло, б – консистентный смазочный материал.

Согласно стандартной методике [210] для определения P_k и P_c требуется выполнить несколько однотипных испытаний с новыми контактирующими материалами и порцией смазочного материала при увеличении нагрузки с заданным шагом. Однако, если выполнить тест с непрерывно возрастающей нагрузкой по тому же ряду нагружения (рисунок 6.3) и использовать предлагаемый подход анализа АЭ, то по АЭ-признакам можно определить критические нагрузки (P_k^{AE} и иногда P_c^{AE}) с относительно небольшим (до 10%) отклонением от значений, полученных по [210]. Эта погрешность связана с ростом пятна контакта (снижением контактного давления) на предыдущем весе. Таким образом, из методики [210] можно исключить все испытания по первому ряду нагрузок, а оставить уточнение значения по второму ряду нагрузок в пределах P_k^{AE} и P_c^{AE} . При этом понимание: достигнут ли уже задир или нет (т.е. диаметр пятна износа выше табличного или нет) – определяется по наличию и характеристикам сигналов \blacksquare -типа. Таким образом, применение метода АЭ позволяет сократить количество испытаний и, соответственно:

расход смазочного материала; расход контактирующих элементов и общее время их проведения, а значит снизить в целом себестоимость трибологических испытаний.

Задача 3. Повышение ресурса работы узла трения на основе применения АЭ средств обратной связи.

Когда статистически определены кластеры АЭ, соответствующие различным механизмам износа, и известны критические условия трения и изнашивания, которые они сопровождают, становится возможным использовать метод АЭ в качестве обратной связи. При этом целью применения АЭ может быть, как оперативное снижение негативных последствий, возникающих при критических режимах трения и изнашивания, так и их предотвращение, что может быть реализовано следующим образом. Во время мониторинга работы трибоузла ведется наблюдение за появлением кластеров критического вида или увеличения их активности регистрации (▲ или ■-типа на рисунках выше). Как только достигаются заданные предельные АЭ признаки, например, появляются кластеры, сопутствующие интенсивному схватыванию поверхностей (предзадирное состояние), то следящая автоматическая система дает команду подать под давлением в контакт смазку или снизить нагрузку на узел трения, или реализовать другие мероприятия, позволяющие продлить его ресурс или сигнализировать о приближении к критической фазе трения. Важно то, что эти меры могут быть реализованы в автоматизированном режиме непосредственно в процессе эксплуатации узла трения.

Полученные результаты показывают, что применение предлагаемого метода позволяет существенно расширить информативность трибологических испытаний и за счет перепроверки результатов на нескольких уровнях анализа снизить вероятность ошибок в их выводах, что особенно актуально при длительных и многофакторных видах трибологических испытаний (когда во время испытаний изменяются условия трения и изнашивания). А формализация процедуры записи и обработки АЭ данных путем построения хронологической карты разрушения узлов трения при автоматизации обработки экспериментальных данных однотипных исследований позволяет выделить главные результаты, облегчить восприятие информации и ускорить анализ данных и их сравнение. Таким образом, предлагаемый метод анализа шумоподобной АЭ показал свою пригодность для данного направления применения. Все основные результаты, полученные в рамках обозначенной задачи, обсуждались на профильных конференциях [А33, А38, А43, А44, А46, А48] и освещены в следующих изданиях [А1, А7, А8, А10, А11, А19, А23].

6.2. Выявление усталостных трещин на оборудовании, работающем в циклическом режиме

В переходный период, наступивший после развала Советского Союза, вся страна находилась в сложном положении. Исключением не стали и крупные предприятия, которые были вынуждены экономить на замене и обновлении, как оборудования целиком, так и их основных элементов. Подобная ситуация сложилась и на одном из крупнотоннажных целлюлозно-бумажных комбинатов (ЦБК), где с 1994 года практиковалась не замена изношенных цапф сушильных цилиндров картоноделательных машин (КДМ), а их восстановление. При этом основной износ цапф приходился на посадочное место подшипника. Однако с 2007 года начали происходить обрывы цапф сушильных цилиндров на КДМ (рисунок 4.4), что сопровождалось их падением с повреждением сушильного полотна и продукта (непрерывной ленты картона шириной 4,5 м). Однако, учитывая высокую скорость выпуска продукта (350 м/мин), основной ущерб предприятия состоит не в стоимости замены цапф и полотна, а в потерях от простоя производства за время внепланового ремонта. В процессе работы КДМ непрерывно контролируются вибрация и нагрев цапф сушильных цилиндров в сборе с подшипниковым узлом. Анализ вибро- и термодиагностических данных по всем 12 авариям, произошедших с обрывом цапф до 2017 года, не выявил предвестников аварийной ситуации, по которым уже имеющимися диагностическими средствами возможно было бы заранее определить критическое состояние цапф. Поэтому потребовалась разработка нового подхода по оценке дефектности цапф, в основе которого было предложено использовать метод АЭ.

Макро и микроскопический анализ изломов аварийных цапф показал (рисунок 4.21г), что причиной их разрушений являются усталостные микротрещины, которые зарождаются в нескольких местах (очагах) у галтельного перехода подшипникового узла при его работе медленно растут и объединяются в одну макротрещину. Макротрещина растет с большей чем микротрещины скоростью и когда её размер занимает более 60% сечения цапфы ее рост ускоряется и как только ослабленное трещиной сечение теряет несущую способность происходит долом цапфы со скручиванием. При этом расстояние между усталостными бороздками в зоне линейного роста трещины составляло $0,5 \div 1,0$ мкм. Примечательным во всех случаях является то, что обрывались только восстановленные цапфы (с наплавкой) и что обрыв цапф происходил только у галтельного перехода подшипникового узла (финишная зона наплавки). В 2012 году была набрана достаточная статистика для понимания причины аварий, поэтому начиная с этого

года восстановление цапф наплавкой было запрещено и далее при ремонте сушильных цилиндров изношенные цапфы заменялись только на новые.

Однако с 1994 по 2012 год наплавкой было отремонтировано более 73 цапф (точное количество проведенных ремонтов не известно) при этом не фиксировались дата ввода в эксплуатацию восстановленных цапф и места их установки. Поэтому на данный момент невозможно установить какая цапфа была наплавлена и сколько раз, сколько она проработала и на каком сушильном цилиндре сейчас установлена. Между тем, всего в составе всех КДМ сегодня эксплуатируется порядка 196 сушильных цилиндров (392 цапфы), которые невозможно одновременно снять, разобрать, выявить восстановленные цапфы и заменить их на новые. Т.к. за ежегодный капитальный ремонт (две недели) КДМ технически и экономически возможно заменить не более 5 сушильных цилиндров (10 цапф). Понимая, что каждая восстановленная цапфа в составе КДМ представляет собой «мину замедленного действия» была поставлена задача провести ранжирование цапф сушильных цилиндров по степени поврежденности (опасности) с целью планирования постепенного вывода сушильных цилиндров из эксплуатации, исследования на наличие наплавки и замены восстановленных цапф, но начиная с наиболее поврежденных (опасных) и только во время капитального ремонта. Для решения поставленной задачи было решено использовать предлагаемый подход оценки спектрально-временного подобия АЭ на нескольких масштабных уровнях. Однако Заказчиком работ было установлено условие адаптировать данный метод для ее выполнения стандартными средствами пороговой АЭ системы предприятия, что было выполнено следующим образом.

Основанием для применения метода АЭ является его преимущество обнаруживать активные (развивающиеся) дефекты, к которым относятся трещины всех видов и направлений, а также возможность их классификации по степени опасности для конструкции. Ограничениями применения метода АЭ во время эксплуатации являются высокая рабочая температура и частота вращения сушильных цилиндров, поэтому корректные и безопасные АЭ измерения возможно выполнить только после остановки и вывода КДМ на капитальный ремонт. Еще одним ограничением является необходимость АЭ измерений непосредственно на КДМ. В этом случае цапфы доступны для АЭ контроля (установки ПАЭ) только в местах, указанных на рисунке 4.5. Из рисунка видно, что место установки ПАЭ на лицевой цапфе непосредственно находится у контролируемого сечения (места излома) возможного развития трещины, а на приводной ПАЭ отстоит от контролируемого сечения примерно на треть длины цапфы (315 мм).

Оценка механических характеристик материала и получение опорных АЭ данных проводилось на фрагментах аварийной лицевой цапфы сушильного цилиндра, разрушившейся в 2017 г. (рисунок 4.4в и 4.4г). Данная цапфа из стали 20Л была восстановлена наплавкой проволоки 08Г2С и установлена на КДМ в 2008 году, т.е. до момента разрушения цапфа проработала 9 лет. Образцы для исследований вырезались из фрагмента цапфы, полученного путем выполнения двух резов на расстоянии 30 и 100 мм от места излома цапфы в сторону фланцевой части. Результаты исследований показали, что материал представлял собой сталь 20Л. Имел однородную феррито-перлитную микроструктуру по сечению цапфы (от поверхности до сердцевины) с баллом зерна $7\div 9$, что соответствует состоянию стали после нормализации или стабилизирующего отжига. Твердость стали составила 120 ± 1 НВ, ударная вязкость КСЧ на уровне 94 Дж/см², предел прочности $\sigma_B = 411\pm 8$ МПа; предел текучести $\sigma_T = 220\pm 12$ МПа; относительное удлинение $\delta_5 = 27,0\pm 0,5\%$. При растяжении материала возникает несколько пластических зон в разных местах рабочей части образца, что видно визуально по «утяжкам» на поверхности образца и по «зубьям» на площадке текучести диаграммы растяжения (деформация Людерса (W. Lüders)). По окончанию разрушения формируется вязкий излом. Прерывистая текучесть и вязкий излом также характерны для стали данного вида в литом состоянии, пороговый уровень коэффициента интенсивности напряжения (КИН), ниже которого зарождение усталостной трещины в стали 20Л не происходит находится в пределах $\Delta K_0 = 18,9\pm 1,0$ МПа·м^{1/2}, среднее количество циклов до разрушения составило $n_{\max} = (74,4\pm 13,2)\times 10^3$; среднее количество циклов до начала и конца линейной стадии роста усталостной трещины составила $n_I = (34,4\pm 18,6)\times 10^3$ и $n_{II} = (67,5\pm 12,5)\times 10^3$ соответственно. Средний размах КИН в начале и конце линейной части соответственно составил $\Delta K_I = 22,9\pm 2,9$ МПа·м^{1/2} и $\Delta K_{II} = 34,4\pm 2,5$ МПа·м^{1/2}. Таким образом, полученные результаты в совокупности говорят в пользу того, что за время эксплуатации основной материал цапфы сушильного цилиндра БДМ не претерпел существенной деградации свойств, охрупчивания или разупрочнения.

В предварительных исследованиях было установлено, что для устойчивой регистрации АЭ от прироста трещины амплитуда сигналов от скачка трещины должна быть более 40 дБ (100 мкВ) для лицевой цапфы и 52,3 дБ (412 мкВ) для приводной. В работе [6] показано, что данным амплитудам сигналов АЭ соответствуют скачки трещин ~ 50 и ~ 200 мкм соответственно. Между тем на реальных изломах цапф (рисунок 4.4) наблюдаемое расстояние между бороздками (скачок) трещины в зоне линейной скорости ее роста составляло $0,5\div 1,0$ мкм, что по данным того же литературного источника

соответствует амплитуде сигнала АЭ до 2 мкВ (6 дБ). Таким образом, в реальных цеховых условиях АЭ измерений даже при установке ПАЭ вблизи зоны развития трещины вероятность ее обнаружения с помощью метода АЭ традиционными способами крайне низка (только на III стадии ускоренного роста трещины, которая по времени самая непродолжительная). Однако цапфы, работающие с трещинами в составе сушильных цилиндров, обязательно должны вызывать движение берегов трещины, причем дважды за каждый рабочий цикл (оборот). Последнее основывается на том факте, что напряжения в цапфе за оборот сушильного цилиндра меняется от растягивающих до сжимающих с переходом через ноль, т.о. следует ожидать АЭ от трения берегов трещины при сжатии-разгрузки и растяжении-разгрузки волокон, что повышает вероятность обнаружения данного источника АЭ. При этом источник АЭ в виде трения берегов неразрывно связано с наличием трещины в материале. На основании вышеприведенных фактов принято решение в основу оценки поврежденности (обнаружения наличия трещины) цапф положить выявление АЭ признаков трения берегов трещины, а за способ активации АЭ источника – вращение сушильного цилиндра непосредственно на КДМ.

На основании этих данных в основу методики ранжирования цапф по степени их поврежденности были положены результаты АЭ, полученные при динамических испытаниях на рост усталостной трещины по схеме приведенной в п. 5.3 Главы 5. На первом уровне обработки данных аналогично был выделен кластер сигналов, совпадающий с признаками трения берегов трещины (аналогично кластеру «■» на рисунке 5.17) с использованием той же схемы анализа АЭ « $F1+f_i+K3$ » (п. 5.2.4 Глава 5). А поскольку одним из входных требований указана адаптация метода к пороговой системе имеющейся на предприятии, то далее были установлены АЭ признаки (предельные значения параметров) кластера «■», по которым были отфильтрованы данные, полученные параллельной пороговой записью АЭ, и построены графики их изменения по времени регистрации, по которым сделаны следующие выводы (рисунок 6.4):

- чувствительными к стадиям роста трещины и мало зависящими от уровня порога дискриминации являются параметры: амплитуда и MARSE (Measured Area under Rectified Signal Envelope). Достоинства первого параметра указаны в п. 3.6 и п. 3.7 Главы 3, а последнего параметра – является одновременная чувствительность к изменению амплитуды и длительности сигнала АЭ, которые в тандеме при пороговом анализе АЭ успешно используются для идентификации помех, шумов и источников АЭ (так называемая корреляция Капистрано [6]);

- в двухкоординатной плоскости «Амплитуда-MARSE» с достаточной точностью можно выделить искомые сигналы кластера «■» от остальных «○» используя всего два фильтра (один по амплитуде, второй по энергетическому параметру). При этом сами кластеры хоть и различимы, но имеют область пересечения (рисунок 6.4в);

- амплитуда сигналов АЭ и MARSE при зарождении трещины (I участок – рисунки 5.11, 5.17 и 6.4) не превышает 60 дБ и $16 \cdot 10^7$ у.е. соответственно, а сами распределения параметров имеют двухмодальный вид;

- на стадии линейного роста трещины (II участок – рисунки 5.11, 5.17 и 6.4) дополнительно к сигналам АЭ I участка регистрируются сигналы амплитудой 60-76 дБ и MARSE более $24 \cdot 10^7$ у.е. При этом вид распределения у обоих параметров становится трехмодальным с модой третьего пика в районе 75 дБ и $20 \cdot 10^7$ у.е. соответственно;

- на стадии критического (ускоренного) роста трещины (III участок – рисунки 5.11, 5.17 и 6.4) также сохраняется третья мода в распределениях амплитуды и MARSE с пиком около 75 дБ и $20 \cdot 10^7$, но скачки трещины гораздо больше, поэтому амплитуда сигналов АЭ выше и достигает порядка 90 дБ, MARSE $40 \cdot 10^7$ у.е.

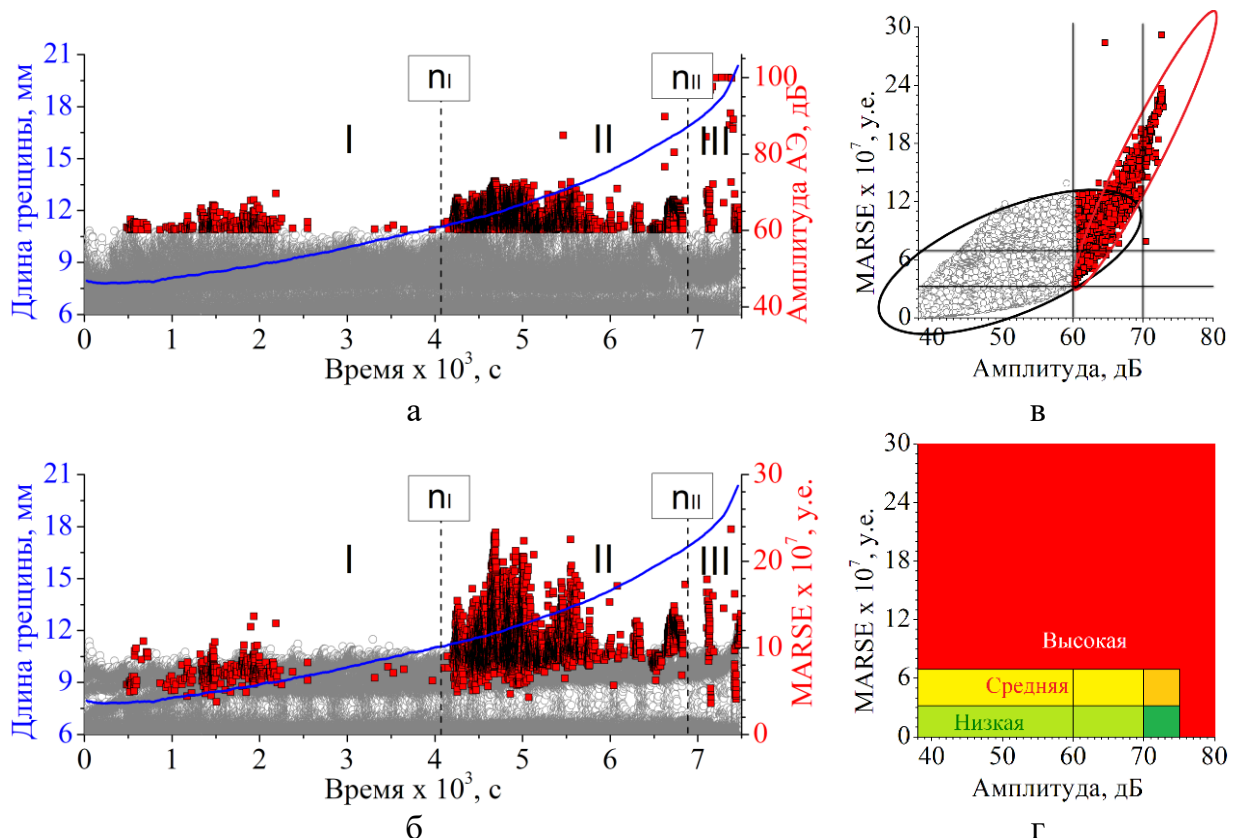


Рисунок 6.4 – Общий вид изменения АЭ при пороговой ее регистрации в испытании на рост усталостной трещины в материале цапфы по параметрам амплитуда (а) и MARSE (б) после разделения сигналов на кластеры во взаимных координатах (в) и сформированное по ним классификационное поле оценки поврежденности цапф (г).

Полученные на первом этапе обработке выводы говорят о том, что АЭ оценка поврежденности цапф с трещинами на этапе их зарождения (I участок) не будет иметь существенного отличия от новой (бездефектной) цапфы. Однако на линейном и критическом этапах роста трещины в цапфе (II и III участок) ее выявление по АЭ становится возможно, т.е. имеется принципиальная возможность ранжировать цапфы по степени поврежденности и, следовательно, установить очередность их вывода из эксплуатации в капитальный ремонт БДМ для контроля и замены.

При значениях величин амплитуды и MARSE АЭ сигналов менее нижних значений критического кластера сигналов «■»-типа (до 60 дБ и $3,3 \cdot 10^7$ у.е.) принимаем низкую степень поврежденности цапфы, как соответствующую материалу без трещины. Здесь следует выделить, что продлением данной зоны до 75 дБ при MARSE менее $3,3 \cdot 10^7$ у.е. убираются всегда имеющиеся импульсные помехи высокой амплитуды и малой длительностью (по аналогии с корреляцией Капистрано). При значениях амплитуды и MARSE соответственно 60÷70 дБ и $(3,3 \div 6,7) \cdot 10^7$ у.е. присваивается средняя степень поврежденности цапфы, как наблюдаемая на стадии зарождения трещины. При этом данная зона продлялась вверх до 75 дБ, т.к. в серии экспериментов сигналы в данной зоне достигали данной величины, а продление вниз до 38 дБ (уровня цехового шума) имеет целью компенсировать затухание сигнала и погрешность установки ПАЭ, при котором MARSE уменьшается медленнее амплитуды, поэтому возможно смещение «полезных» сигналов в данную область. При АЭ амплитудой более 60 дБ и MARSE более $6,7 \cdot 10^7$ у.е. устанавливается высокая степень поврежденности, т.к. она наблюдается на стадиях линейного и ускоренного роста трещины. При этом продление данной зоны вниз до 38 дБ (уровня цехового шума) имеет ту же цель, что и выше, а любые сигналы амплитудой более 75 дБ признаны, соответствующими высокому уровню опасности, как требующие проверки по умолчанию для порогового способа анализа АЭ по амплитудному критерию и критерию MONPAC [6, 10, 173].

Полученные граничные значения параметров амплитуды и MARSE совпали с данными, которые получали в предварительных АЭ измерениях на «бездефектных» и «дефектных» цапфах, поэтому они были выбраны за опорные. В предварительных АЭ измерениях в качестве дефектных / бездефектных использовались четыре цапфы, в которых при ультразвуковом (УЗ) контроле были обнаружены / не обнаружены трещиноподобные дефекты в контрольном сечении (рисунок 4.5). В качестве «бездефектных» цапф использовались те же четыре сушильных цилиндра после замены

дефектных цапф на новые, которые были изготовлены точением из поковки и крепились к крышкам цилиндра болтовым соединением. Кроме них за «бездефектные» принимались три сушильных цилиндра с цапфами цельнолитыми с крышками цилиндра, на которых дефектов подобного вида не наблюдалось по опыту их эксплуатации на двух разных ЦБК. Однако из рисунка 6.4 и вышеприведенного описания видно, что в виду близости и перекрытия контрольных диапазонов кластеров сигналов АЭ, а также некой перестраховки, заложенной при установлении границ классификационных параметров, возможны ложные выводы и перебраковка годных цапф. Поэтому для снижения вероятности таких событий вводился II уровень обработки АЭ данных, который из-за специфики пороговой регистрации АЭ также реализован в измененном виде, а именно следующим образом.

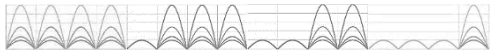
Согласно предлагаемому методу обработки шумоподобной АЭ (п. 2.4 Глава 2) на втором уровне анализируется подобие кривых изменения выбранных оценочных параметров по циклам нагружения. Как было сказано выше, пик проявления источника в виде трения берегов трещины при вращении сушильного цилиндра совпадает с прохождением им верхнего положения (сжатие волокон) и нижнего положения (растяжение волокон), поэтому второй уровень обработки заключался в проверке подобия проявления параметра оценки АЭ сначала опорным кривым, полученным на «бездефектных» и «дефектных» цапфах, а затем между циклами нагружения в рамках одного испытания – график которого приведен на рисунке 4.6 Главы 4. Таким образом, первое сравнение имеет целью установить принадлежность нормальному/ненормальному техническому состоянию, а второе сравнение – повторяемость выявленного АЭ признака при следующих четырех нагружениях. Повторение АЭ признака соответствующей опорной кривой в трех и более нагружениях считается признаком отсутствия/наличия дефекта, а менее – случайной помехой.

В качестве параметра оценки АЭ на II уровне обработки была выбрана $\dot{N}(t)$ – активность АЭ, т.к. ее изменение коррелирует с параметром MARSE, но имеет меньший разброс значений, что позволяет сгладить данные с меньшей потерей информативной составляющей. В качестве процедуры сглаживания использовалось вычисление среднего значения активности АЭ (\bar{a}_N). В качестве алгоритма кластеризации использовался *KI* (п. 4.3.2.1 Главы 4). Расчет \bar{a}_N проводился по формуле (3.24), в которой вместо $a(t)$ подставлялось $\dot{N}(t)$. В указанных выше предварительных измерениях АЭ на «бездефектных» и «дефектных» цапфах было установлено, что при отсутствии дефектов (низкая степень поврежденности цапфы) уровень $\dot{N} < 36$ имп/с. В дефектных цапфах

(высокая степень поврежденности цапфы) уровень $\dot{N} \geq 90$ имп/с. Общий вид диапазона изменения \bar{a}_N за один оборот при принятом посекторным графике нагружения цапф (рисунок 4.6 Главы 4) показан в таблице 6.4. Там же приведены расчетные значения коэффициента подобия R -квадрат (п. 4.3.2.1 Глава 4) при возможных вариантах его изменения относительно опорной кривой, а именно: увеличение активности в каждом секторе и в любых трех, двух и одном секторе. При этом первое значение R -квадрат (R^2_1) используется при оценке подобия кривых изменения \bar{a}_N опорным данным (средние кривые изменения \bar{a}_N при АЭ измерениях на «бездефектных» цапфах). Второе значение R -квадрат (R^2_2) используется при оценке подобия кривых изменения \bar{a}_N между циклами нагружения (оборотами) внутри одного АЭ измерения по графику (рисунок 4.6 Главы 4).

На III уровне обработки АЭ проводится финальное подтверждение поврежденности цапфы. На данном этапе цапфа считается поврежденной, если признаки I и II уровня обработки АЭ (рисунок 6.4г и таблица 6.6) совпадают не менее трех раз в пяти следующих друг за другом циклах нагружения цапф сушильного цилиндра. Итоговые значения контрольных параметров, выбранных для апробации предлагаемого метода сведены в таблицу 6.4.

Таблица 6.4.

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 R^2_1 R^2_2	< 36 не определяется не определяется	≥ 70 < 0,15 > 0,3	≥ 90 < 0,15 > 0,3
III	Количество повторов Общий вид \bar{a}_N за оборот	не определяется не определяется	3 из 5 циклов нагружения (оборотов) 	

Понятно, что, несмотря на трехуровневую процедуру формирования итогового вывода, все равно сохраняется некоторая неопределенность АЭ контроля, связанная с наличием других возможных акустических источников, поэтому в методе закладывается обязательность подтверждения трещины УЗ контролем в случае установления высокой степени поврежденности цапфы, и рекомендуемым – при средней степени поврежденности. На основании вышеприведенных положений была разработана «Экспресс-методика оценки акустико-эмиссионной активности цапф сушильных цилиндров картоноделательных машин» зарегистрированная за № МАЭК-СЦКДМ-001-2019 (Приложение Д), которая была апробирована на предприятии-Заказчике при

диагностике цапф сушильных цилиндров КДМ в капитальный ремонт 2018, 2019 и 2021г. и показала следующие результаты.

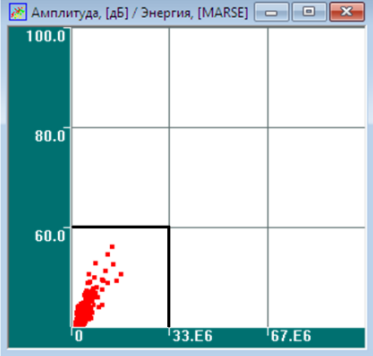
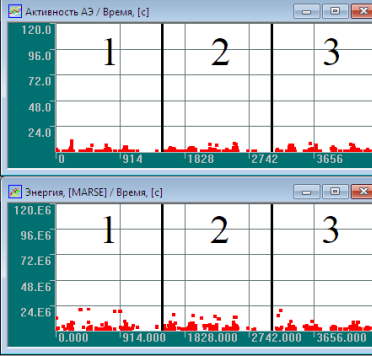
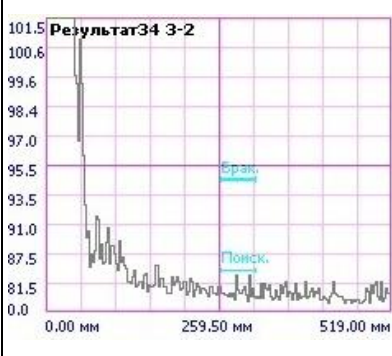
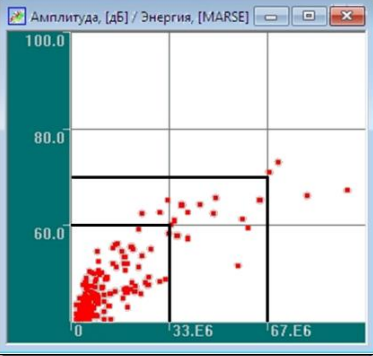
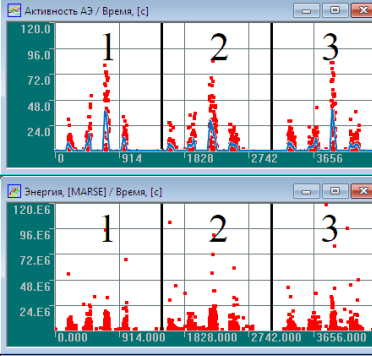
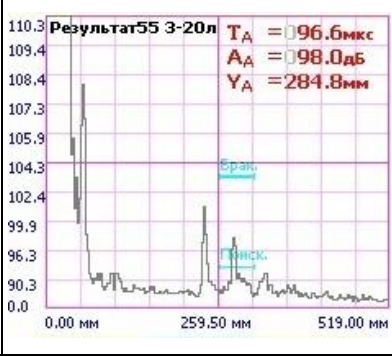
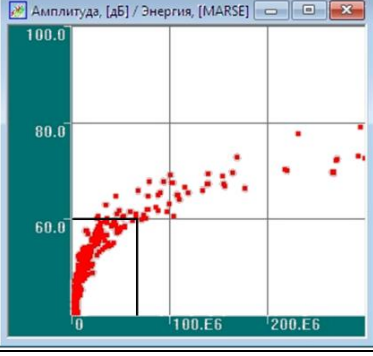
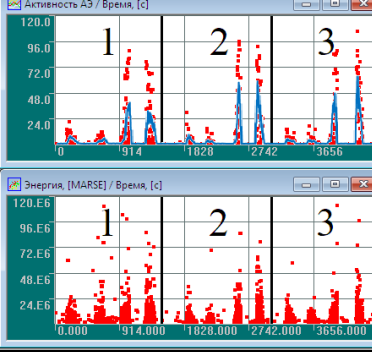
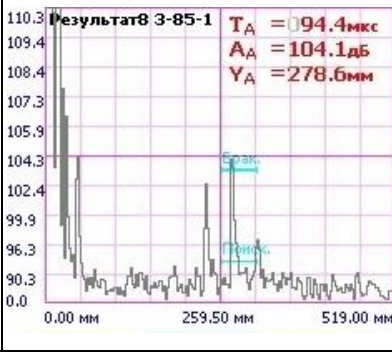
По данной методике в общей сложности за 38,6 часов выделенного времени на АЭ измерения в капитальный ремонт (8,3 часа в 2018 г.; 11,7 часов в 2019 г. и 18,6 часов в 2021 г.) было проконтролировано 178 цапф (или 89 сушильных цилиндров) непосредственно на КДМ за 10 установок системы (3 в 2018 г., 4 в 2019 г. и 3 в 2021 г.). Всего на КДМ 392 цапфы (196 цилиндров), т.о. за обозначенное время в прямом счете было обследовано 54,5 % цапф КДМ. Учитывая, что плановый капитальный ремонт КДМ составляет 7 дней то видно, что данной методикой реально провести контроль всех цапф КДМ за время остановки. Однако это при прямом счете, а в номенклатурном счете всего было проконтролировано 148 цапф, т.к. 30 из них для сравнения контролировались и в 2018 и в 2019 г. Во всех случаях АЭ измерениям подвергались наиболее нагруженные по температурному режиму сушильные цилиндры. Следует также выделить, что из-за необходимости разбора опорных элементов за это же время УЗ способом удалось проверить 85 цапф, из которых 80 лицевых (легко доступных для УЗ контроля после снятия крышек подшипникового узла) и 5 приводных (доступных для УЗ контроля только после демонтажа паровой головки). Против 178 цапф (89 лицевых и 89 приводных) проконтролированных АЭ методом. Таким образом, по скорости контроля предлагаемой АЭ методикой относительно УЗ метода получаем двухкратное превосходство при меньших трудозатратах на подготовку из-за отсутствия демонтажно/монтажных работ. Проверка достоверности предлагаемой АЭ методики проводилась сопоставлением результатов АЭ измерений 2018, 2019 и 2021 г. с результатами УЗ контроля, выполненного в то же время.

Таблица 6.5

Метод контроля и оценка его результатов для всех объектов сравнения, $n_{\Sigma} = 68$ цапф		Эталонный метод контроля дефекта в цапфах – ультразвуковой по [215]	
		Число эталонно годных цапф	Число эталонно негодных цапф
АЭ контроль по МАЭК-СЦКДМ-001-2019	Число годных цапф	Дважды годные $n_{Г} = 44$	Недобраковка $n_{\beta} = 6$
	Число негодных цапф	Перебраковка $n_{\alpha} = 12$	Дважды негодные $n_{Н} = 6$
Вероятность принятия безошибочного решения (достоверность АЭ контроля): $D_{АЭ} = (n_{Г} + n_{Н}) / n_{\Sigma} = 0,73$			
Вероятность пропуска дефекта: $P_{\beta} = n_{\beta} / n_{\Sigma} = 0,1$			
Вероятность перебраковки: $P_{\alpha} = n_{\alpha} / n_{\Sigma} = 0,17$			

Оценка достоверности АЭ методики № МАЭК-СЦКДМ-001-2019 была проведена по рекомендациям [6]. Матрица достоверности АЭ методики и результат ее оценки представлен в таблице 6.5, пример результатов АЭ и УЗ измерений, соответствующий низкой, средней и высокой поврежденности цапф, полученный при апробации методики приведен в таблице 6.6.

Таблица 6.6

Признак поврежденности цапфы			
	I уровень АЭ анализа	II уровень АЭ анализа*	Ультразвуковой
Низкий			
Средний			
Высокий			

* - на рисунках сверху график изменения активности АЭ от времени, снизу – MARSE. Цифрами и вертикальными линиями отделены циклы нагружения (обороты цилиндра). Нагружение осуществлялось вращением на 90 град. с выдержкой 180 с. Синие линии – вид огибающих \bar{a}_N , которые использовались для расчета R^2_1 и R^2_2 , и в данном случае имеют значения $R^2_1 < 0,06$, $R^2_2 > 0,49$ и $R^2_1 < 0,11$, $R^2_2 > 0,44$ соответственно для среднего и высокого уровня поврежденности

Причиной достаточно высокого показателя перебраковки считаем наличие у объекта контроля нескольких возможных параллельно действующих источников АЭ: повышенное трение и износ в подшипниковом узле, ослабление или обрыв болтов крепления цапф, заедание в зубчатой передаче, перекос установки сушильного цилиндра, наличие мусора в сушильном цилиндре и др. Однако их влияние на результат АЭ измерений еще предстоит исследовать, как и вопрос возможности применения разработанной методики и для параллельного выявления нескольких причин (источников) выхода сушильных цилиндров из строя.

Несмотря на вышесказанное, очевидно, что апробация реализованного в методике нового подхода подтвердила свою работоспособность, а устранение или добавление в анализ АЭ признаков вышеобозначенных дополнительных источников может быть осуществлено путем корректировки границ, установленных для параметров классификации. Между тем, на основании полученных результатов предприятие в 2018, 2019 и 2020г. в сумме заменило 5 цапф, имевших высокую поврежденность по АЭ измерениям подтвержденную УЗ контролем. При этом начиная с 2018 г. статистика аварий сушильных цилиндров КДМ резко изменила тренд: не произошло ни одной аварии, на основании чего предприятие внедрило АЭ методику, сделав обязательной ее применение на каждом капитальном ремонте (Приложение Д). Полученные результаты обсуждались на профильных конференциях [А39, А40, А43, А47, А49] и подробно описаны в [А3, А17, А18, А28, А50].

6.3. Повышение точности локализации шумоподобных источников акустической эмиссии на примере поиска утечки среды из резервуара

Задача локализации мест капельного истечения жидкой среды из емкостного промышленного оборудования химических, нефтехимических, нефтеперерабатывающих производств при их гидравлических испытаниях возникает в случае невозможности применения для решения данной задачи других методов НК. Такие задачи возникают, если емкостное оборудование имеет: внутреннюю футерованную или гуммированную защиту (резервуары для хранения жидких растворов кислот, солей или щелочи); внешнюю тепловую изоляцию или защитное покрытие (емкости, заглубленные в грунт; изотермические емкости) или ограниченный доступ к части объекта контроля (днище вертикальных стальных сварных резервуаров, блоки разделения воздуха), а также при испытании емкостного оборудования наливом или давлением малой величины (при пневматических испытаниях до давления 0,5 МПа, при гидравлических – до 0,2 МПа).

Объем таких объектов представляет собой значительную часть технических устройств ОПО, которую составляют емкостное промышленное оборудование, работающее под вакуумом, наливом (только гидростатическое давление продукта) или под давлением близким к атмосферному.

Лабораторные исследования на универсальном учебно-исследовательском стенде («УУИС» – п.7.4 Глава 7) и промышленные на резервуаре хранения щелочи показали, что при обозначенном выше низком давлении испытаний уровень сигнала АЭ от течи среды через несплошность сопоставим с уровнем окружающего шума. Поэтому при пороговой регистрации АЭ требуется уменьшать уровень порога дискриминации АЭ практически до уровня фона. Учитывая, что фоновый шум хоть и «квази», но не стационарен, то периодически происходит пересечение им уровня порога, т.е. ложное срабатывание амплитудного детектора. Как следствие, с течением времени наблюдения происходит заполнение локационной карты множеством ложных событий, маскирующих реальный источник АЭ – место пропуска среды (рисунок 6.5а). При этом стандартные подходы фильтрации сигналов АЭ зачастую не позволяют отличить «реальные» АЭ события от ложных (рисунок 6.5б), поскольку АЭ практически всегда подобна, т.к. основную долю сигналов составляет энергия фонового шума (рисунок 6.6). Оценим эффективность локализации места течи среды в резервуаре хранения щелочи предложенным методом в сравнении с пороговым методом на реальном практическом примере промышленного АЭ контроля.

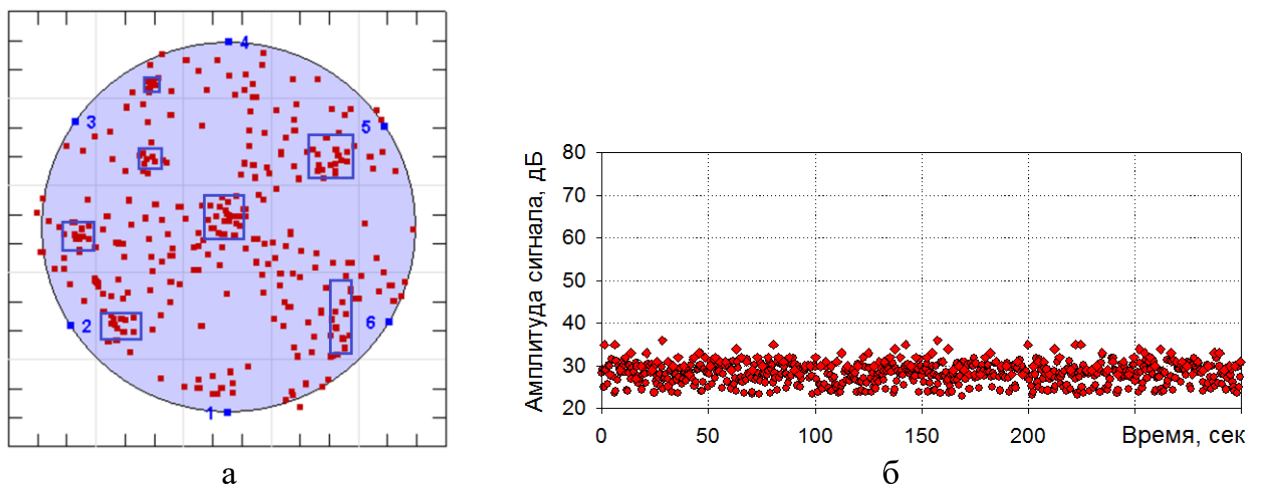


Рисунок 6.5 – Результат, полученный с применением порогового метода при уровне порога 23 дБ, где: а – локационная карта со схемой расстановки преобразователей и кластерами локационных событий, б – график изменения амплитуды сигналов АЭ от времени на контрольной выборке АЭ данных.

Опорными данными для применения предлагаемого метода являлись АЭ кадры шума, которые были записаны непосредственно перед проведением гидроиспытания, что

по п. 2.1 Главы 2 представляет собой функцию $f(a, D_1)$. Общий вид сигналов шума и усредненный вид их СПМ $G^*(f, D_1)$ представлен на рисунке 6.6. Там же на нем приведен общий вид сигналов шума и течи $f(a, D_2)$, и усредненной вид их СПМ $G^*(f, D_2)$. Выделение кадров $f(a, D_2)$ из общего массива АЭ данных, полученных за время гидроиспытания резервуара при условиях приведенных в п. 4.1.4 Главы 4, проводилось после их нормировки (формулы (2.15) и (2.16)) методом кластеризации $K1$ (п. 4.3.2.1 Главы 4) при $[R\text{-квадрат}] \geq 0,4$. Данное значение обеспечивало разделение нормированных кривых СПМ $G^*(f, D_1)$ и $G^*(f, D_2)$ на две группы (рисунки 6.6 и 6.7). Такой подход основывался на гипотезе, что при постоянном давлении испытания (течь не приводила к существенному падению давления в течение времени наблюдения) могут быть только два вида сигналов: шумовые сигналы квазистационарного окружающего фона без и с наложением АЭ от истечения испытательной среды через несплошность. При этом с протечкой будет связана группа (кластер), имеющая более высокочастотные составляющие, связанные с аэрогидродинамическими эффектами, возникающими при течении среды в канале несплошности и на выходе из него [15].

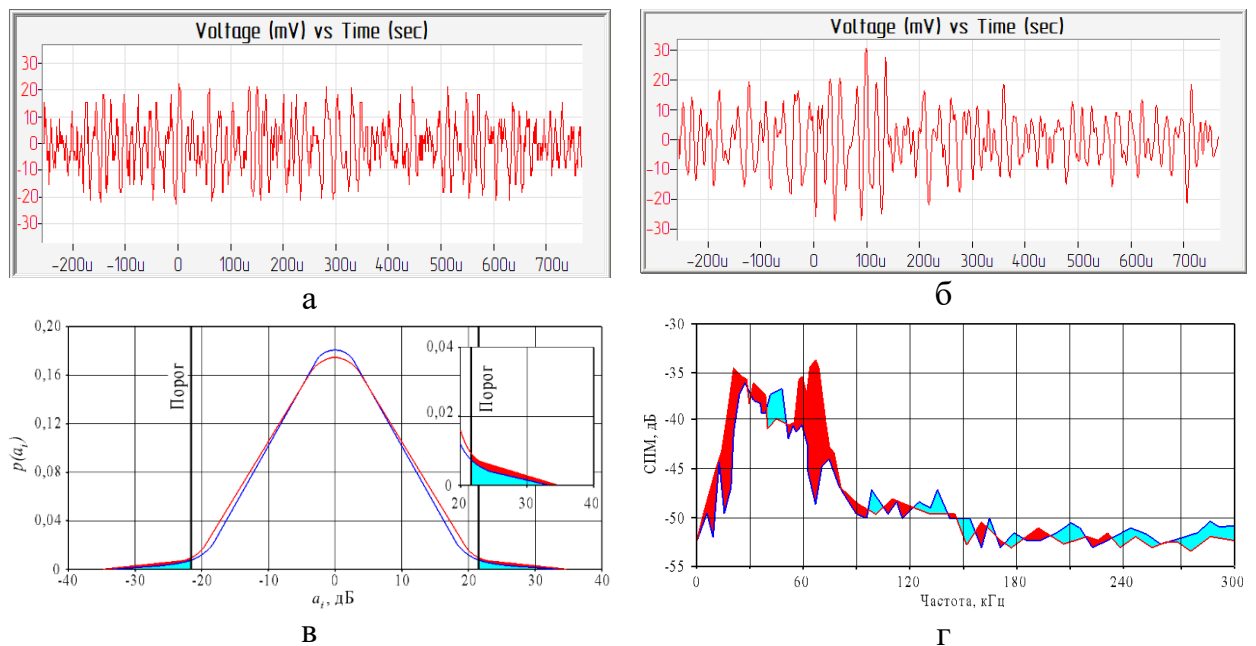


Рисунок 6.6 – Общий вид амплитудно-волновой формы шума (а), шума с сигналом (б) и их усредненные амплитудные распределения (в) и СПМ (г), где: красная площадь – превышение СПМ сигнала над СПМ шума, а синяя – наоборот.

Анализ результатов кластеризации показал (рисунок 6.6г), что максимальная мощность СПМ у обеих групп сигналов находится в узком частотном диапазоне в районе 40 кГц. В связи с этим, известные способы разделения сигналов по центральной (основной) частоте в данном случае оказались не результативными. Единственным

существенным отличием сигналов второй группы является наличие дополнительного локального максимума в частотной области $60\div 80$ кГц (рисунок 6.6г). Общее количество кадров АЭ во второй группе на порядок меньше, чем в первой (рисунок 6.7). При этом амплитуда в кадрах записи АЭ сигналов второй группы превышает сигналы первой в среднем, всего на 2-4 дБ (рисунки 6.6 и 6.7). Поэтому широко известный способ классификации сигналов, основанный на амплитудном анализе, также оказался не эффективным.

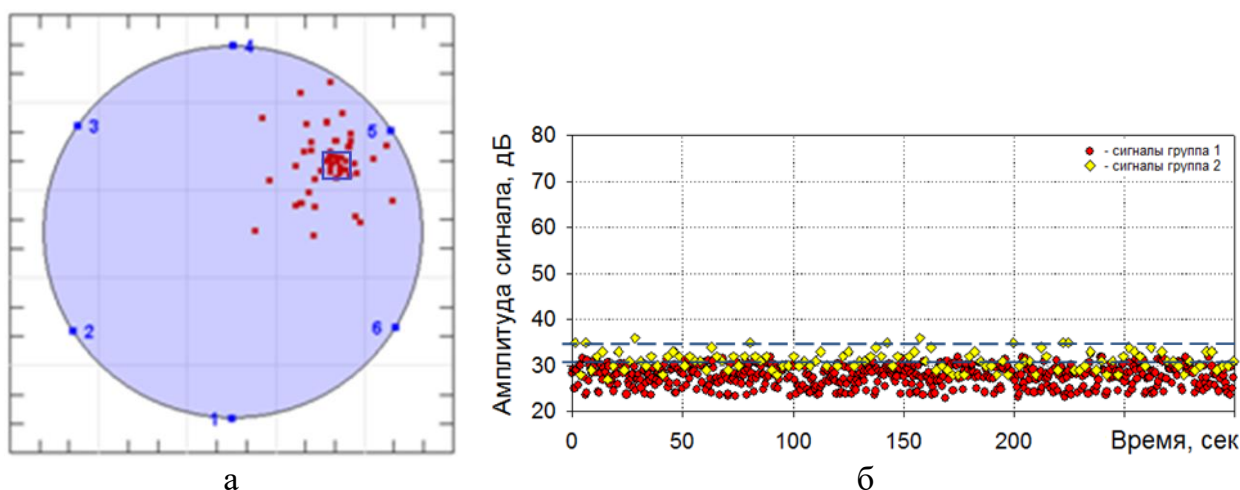


Рисунок 6.7 – Результат, полученный с применением предлагаемого метода, где: а – локационная карта со схемой расстановки преобразователей и кластером локационного события, б – график изменения амплитуды сигналов АЭ от времени регистрации данных, представленных на рисунке 6.5а.

На основании полученных кластерных признаков был сделан вывод о связи с пропуском среды именно сигналов второй группы. Далее была проведена процедура кластерной фильтрации (удаления из обработки) сигналов первой группы и рассчитаны координаты источника сигналов второй группы модифицированным алгоритмом локации шумоподобных источников АЭ, описанным в п. 4.3.3 Глава 4 и [А14, А37]. При этом не пришлось выполнять процедуру установления принадлежности одной группе (кластеру) сигналов, зарегистрированных разными АЭ каналами, т.к. сигналы второй группы четко выделялись по вышеописанным признакам. Однако идеология сравнения периодограмм проявления кластеров по каналам регистрации АЭ подтвердила свою работоспособность, т.к. при определении местоположения источника АЭ были сформированы реальные локационные события, что говорит о корреляции периодограмм проявления кластера второй группы. Модифицированный алгоритм локации позволил выявить место пропуска с точностью 100×100 мм (рисунок 6.7). Повторный внутренний осмотр области, назначенной по результатам АЭ контроля, с локальным вскрытием защитного покрытия

только в указанном месте подтвердил наличие в нем дефекта. После устранения дефекта повторное гидравлическое испытание резервуара с выдержкой испытательной среды на плотность под атмосферным давлением в течение 24 часов дало положительный результат.

Оценка эффективности локализации течи предлагаемым методом и амплитудным пороговым методом проводилась через оценку вероятности обнаружения координат источника по методике, приведенной в п. 4.3.4 Главы 4. Результаты расчета сведены в таблицу 6.7, где также приведены показатели оценки и цены ошибки локации.

Таблица 6.7

Параметр сравнения	Амплитудный метод	Предлагаемый метод
Методика контроля	[10]	KI^* , $R^2 \geq 0,4$
Общее количество локационных кластеров АЭ	7	1
Количество ложных локационных кластеров АЭ	6	0
Вероятность обнаружения источника по количеству событий в АЭ кластере, $P_{лс}$, % - формула (4.20)	6,5	40,1
Вероятность обнаружения источника по площади АЭ кластера, P_s , % - формула (4.21)	60,8	59,6
Относительные затраты на перепроверку данных и ремонт после контроля связанные с ошибкой определения места АЭ источника, $Z_{нд}$, у.е.	7	1
* - обозначение алгоритма по п. 5.2.4 Главы 5.		

Из таблицы 6.7 видно, что предлагаемый метод позволил в 6,1 раз (на 33,6 %) повысить вероятность обнаружения источника по количеству событий в АЭ кластере ($P_{лс}$), при 7-кратно меньших затратах ($Z_{нд}$). При это параметр $P_{лс}$, по сути, является параметром однозначности отображения кластера АЭ источника на локационной карте. Сопоставимые значения вероятности обнаружения источника по площади АЭ кластера (P_s) указывают на то, что назначая перепроверку результатов АЭ контроля дополнительными методами НК можно существенно поднять вероятность обнаружения амплитудного порогового метода, но в ущерб себестоимости контроля. Если соотнести затраты к единицы вероятности обнаружения $Z_{нд}/P_s$, то получим разницу в 7 раз, а при соотношении $Z_{нд}/P_{лс}$ в 44 раза.

Однако здесь для объективности сравнения следует также отметить и ограничения предлагаемого метода, которые были выявлены при исследованиях на «УУИС», а именно. Известно [6, 15], что при истечении газообразной среды в газообразную среду через несплошность фиксированного размера увеличение перепада давления приводит к увеличению амплитуды АЭ до достижения критической скорости истечения, после

которой параметры АЭ не изменяются. Данный эффект нашел подтверждение и в наших экспериментах. Однако увеличение амплитуды АЭ от течи приводит к тому, что с определенного её значения сигнал прежде чем затухнуть успевает обогнуть объект контроля несколько (до пяти) раз. Огибающие волны накладываются на окружающей шум, и, несмотря на затухание, сохраняют основные спектральные признаки источника, что при обработке приводит к сбою алгоритмов кластеризации АЭ данных по подобию формы их кривой спектральной плотности мощности (формируется один кластер). Поэтому в этом случае дополнительно требуется применение процедуры разделения первичных АЭ сигналов (не обогнувших объект контроля) от вторичных (те же сигналы, обогнувшие один или несколько раз объект контроля), что представляет собой отдельную и совсем не тривиальную задачу, пока не имеющую окончательного решения. Однако учитывая, что истечение среды с высокой скоростью имеет большой расход среды и обнаруживается на слух, то задача локализации таких течей может быть решена другими методами.

Таким образом, в процессе исследований на универсальном учебно-исследовательском стенде, помимо указанных в формулах (2.31) и (2.32) Главы 2, были выявлены дополнительные ограничения применения предлагаемого способа, для учета которых еще требуется проведение дополнительных исследований и разработки процедур обработки АЭ от мощных шумоподобных источников. Вместе с тем, установлено, что возможно уменьшить влияние обозначенных эффектов на конечный результат путем снижения давления в емкостном оборудовании во время проведения АЭ испытания или путем увеличения расстояния между преобразователями АЭ в антенной группе.

Несмотря на выявленные ограничения, видно, что в данном практическом примере использован I уровень метода п. 2.4 Главы 2, который подтвердил свою работоспособность. Так как его было достаточно для решения поставленной задачи, то II и III уровни метода здесь не применялись. Кроме этого, полученные результаты подтверждают возможность определения координат шумоподобных источников АЭ на I уровне предлагаемого метода с применением модифицированного алгоритма локации, разработанного в рамках настоящей работы и приведенного в п. 4.3.3 Главы 4. Полученные при апробации результаты обсуждались на профильных конференциях [А37, А43] и подробно освещены в следующих изданиях [А14, А19, А24], а способ локализации шумоподобного источника АЭ был запатентован (Приложение Е).

6.4. Организация обратной связи для контроля режима работы роторного оборудования на основе метода акустической эмиссии на примере поддержания режима работы кавитационной установки

Сегодня в промышленности с помощью роторных аппаратов и установок решается широкий спектр технологических задач – это: гомогенизация, нагревание, диспергирование, эмульгирование, перемешивание, обеззараживание, аэрация и др. операции подготовки и получения жидкого сырья или продуктов. Однако максимальная эффективность применения роторных установок достигается на определенном режиме их работы, который, в свою очередь, зависит от физико-химических свойств и качеств обрабатываемой жидкой среды на входе (загрузке), и их изменения в процессе ее обработки из-за нагрева, насыщения газом, добавки компонентов и др. факторов. При этом указанные факторы взаимосвязаны, так: вязкость среды оказывает нагрузку на двигатель влияя на стабильность поддержания им оборотов ротора; вязкость среды зависит от температуры нагрева и количества растворенных компонентов и газа; разогрев среды зависит от скорости ее прокачивания через установку; скорость прокачивания среды определяется технологией получения продукта. Кроме этого, в непрерывном технологическом цикле зачастую качество исходного сырья и сопутствующих расходных материалов изменяется от партии к партии или вообще может быть осуществлен безостановочный переход на принципиально другое исходное сырьё, присадки, катализаторы, ингибиторы и прочие добавки. Таким образом, для обеспечения высокой эффективности технологической операции режим работы роторных аппаратов и устройств (условия обработки жидкой среды) должен изменяться параллельно изменению свойств обрабатываемой среды, т.е. постоянно подстраиваться. Поэтому в системе управления роторных установок должны быть средства обратной связи, отслеживающие изменение качества и свойств обрабатываемых сред или продукта для автоматической корректировки режима их работы.

В работах [39, 249, 250] показано, что одним из эффективных режимов обработки жидких сред в роторных установках является режим, обеспечивающий непрерывный срыв вихрей с лопаток перемешивающего элемента. Срыв возникает при достижении некоторой скорости вращения ротора, но затем при ее фиксировании жидкость перемешивается с воздухом, нагревается, разгоняется, течения (потoki) самоорганизуются и процесс обработки переходит от эффективного вихревого к низкоэффективному режиму циркулирования жидкости (вращение) по кругу. Следовательно, необходимо опять изменить частоту вращения ротора до возникновения

вихреобразования в жидкой среде, но неизвестно насколько, т.к. свойства среды за время предыдущего этапа обработки уже изменились. Во многих работах показано (п. 1.3 Глава 1), что возникновение и отрыв вихрей в жидкости сопровождается акустическим излучением в звуковом и ультразвуковом диапазонах частот. Поэтому в работах [39, 249] используются акустические методы в качестве средств обратной связи для настройки и контроля режимов работы роторных устройств. Однако авторы отмечают, что в роторных аппаратах присутствует обилие внешних (шум работы узлов и механизмов, резонансные колебания элементов и др.) и внутренних (удары лопастей ротора о жидкость, гидродинамический шум течения жидкости и т.д.) акустических источников, которые затрудняют идентификацию момента выхода на эффективный рабочий режим. Поэтому на передний план выходит задача распознавания и выделения акустических сигналов от гидродинамических источников, на регистрации которых может быть основан контроль работы роторной установки. Сегодня данная задача решается с помощью интегральных измерений в звуковом и ультразвуковом диапазонах. Оценим эффективность применения в данном направлении АЭ метода в сравнении с методом шумометрии. Для этого рассмотрим общие закономерности проявления акустического излучения в звуковом и ультразвуковом диапазонах на роторных установках, использовавшихся при исследованиях и описанных в п. 4.1.5 Главы 4. Там же приведено описание условий и средств исследований и записи акустических сигналов.

При вращении диска в пустой рабочей камере средний уровень акустического шума пропорционален частоте вращения ротора, поэтому записи, показанные на рисунках 6.8а и 6.8б, представляют собой собственный рабочий шум установки. При наличии жидкости в рабочей камере возникают высокоамплитудные акустические сигналы, не коррелирующие с увеличением частоты вращения ротора (рисунки 6.8в, г). При этом, количество высокоамплитудных сигналов в звуковом диапазоне больше, чем в ультразвуковом (рисунок 6.8а-г).

После снятия корпусных панелей и демпфирования колебаний элементов установки (рисунок 4.7а) часть высокоамплитудных звуковых сигналов пропало, а в ультразвуковой области ничего не изменилось. При этом высокоамплитудные сигналы в звуковой области, совпадающие по времени с высокоамплитудными сигналами в ультразвуковой области, остались, поэтому на данном этапе работы они предположительно были связаны с гидродинамическими процессами в рабочей камере. Эти результаты также показывают более высокое влияние посторонних внешних шумов и резонансов элементов установки на результаты измерений в звуковом диапазоне. Кроме этого, измерения в звуковом

диапазоне имеют меньшую чувствительность, т.к. при последовательном увеличении оборотов замечено, что начиная с некоторого значения звуковой уровень перестает отображать изменение оборотов, чего нет в ультразвуковом диапазоне (рисунки 6.8д, е). Поэтому для проведения дальнейших исследований и в качестве обратной связи для построения автоматической следящей системы был выбран метод АЭ, как более чувствительный и шумозащищенный.

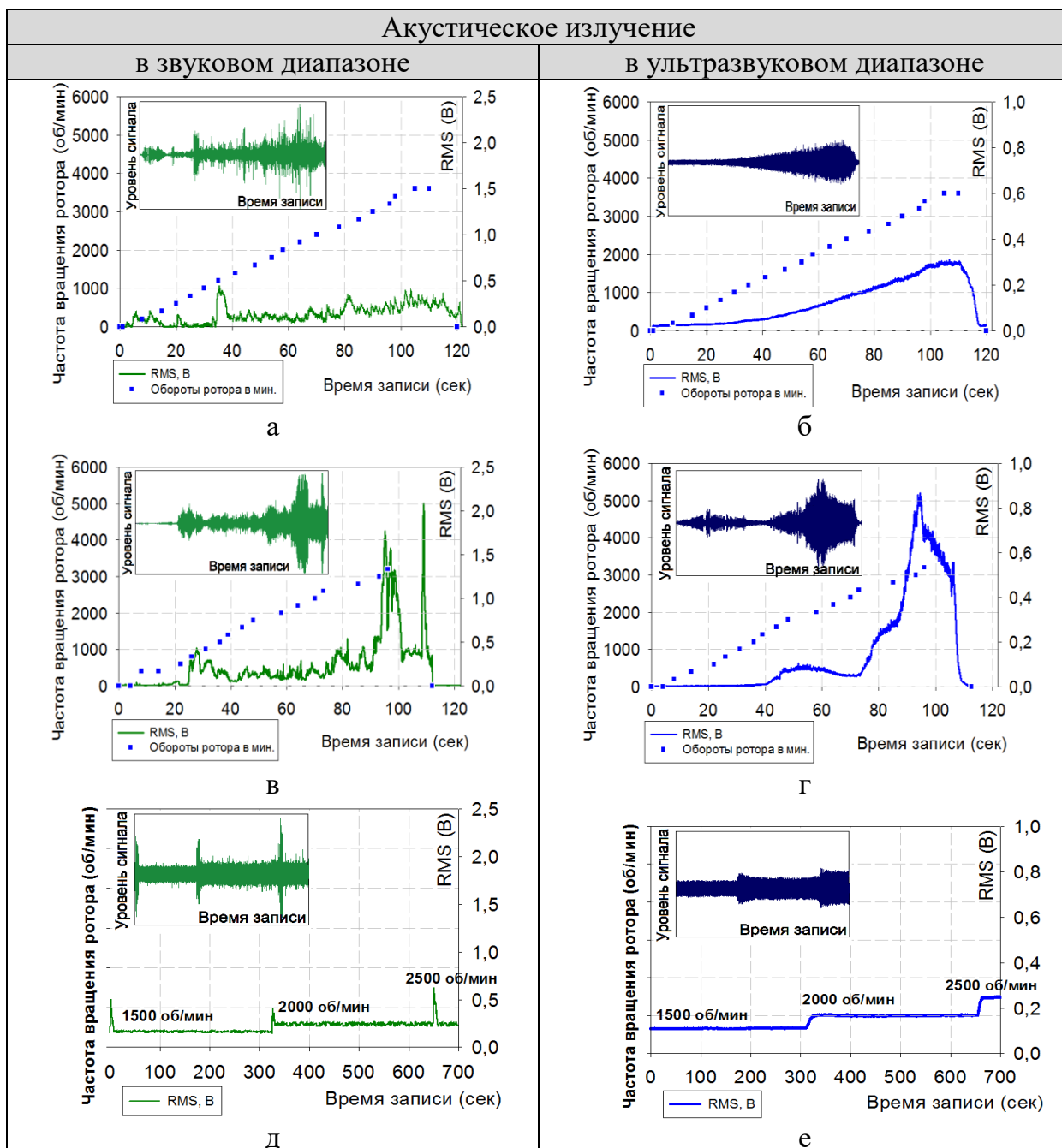


Рисунок 6.8 – Сопоставление результатов регистрации акустических сигналов в звуковом и ультразвуковом диапазонах при непрерывном наборе оборотов ротора с пустой (сухой) рабочей камерой (а) и (б), и заполненной жидкостью (в) и (г), а также на фиксированных оборотах ротора, при заполненной жидкостью рабочей камере (д) и (е). На вставках в левом верхнем углу показано изменение уровня акустических сигналов за время испытания.

Для изучения влияния на АЭ внешних и внутренних факторов (температуры жидкости, скорости потока жидкости через камеру, режима разгона-торможения жидкости в рабочей камере, направления подачи жидкости и наличия «газовой подушки») были проведены дополнительные исследования, которые показали следующее. Изменение температуры среды и скорости её потока через рабочую камеру приводит к сдвигу пиков среднеквадратичного значения АЭ (RMS – формула (3.6)) относительно частоты вращения ротора, на которых они наблюдались (рисунок 6.9). При этом при более высокой температуре жидкости и скорости ее прокачки через камеру уровень пиков RMS АЭ выше, а сами пики сдвигаются в сторону низких оборотов. При малой температуре жидкости и скорости ее прокачки через камеру пики RMS АЭ наоборот ниже и наблюдаются при более высоких оборотах ротора. Кроме этого, по мере увеличения скорости прокачки жидкости возникают новые пики RMS (рисунок 6.9) и меняется вид ранее наблюдавшихся.

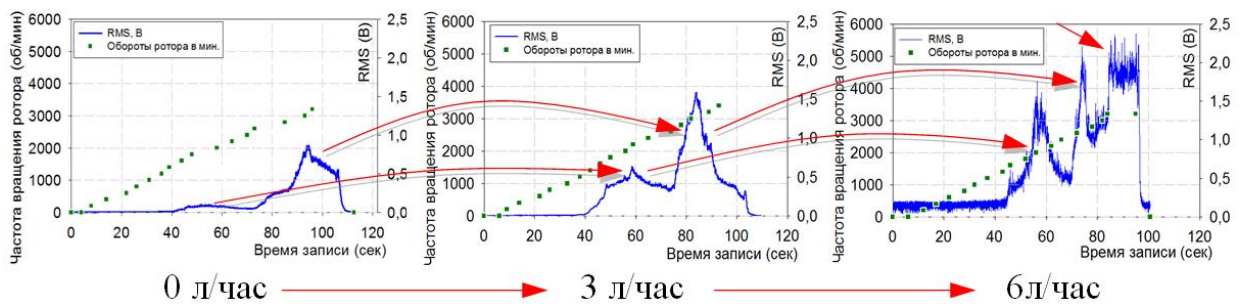


Рисунок 6.9 – Пример влияния скорости прокачивания жидкости через рабочую камеру на возникновение и сдвиг пиков RMS АЭ

Полученные результаты вполне закономерны, т.к. изменение вязкости среды и скорости ее течения (прокачки) приводит к изменению числа Рейнольдса, а значит и характеру течения жидкости. Для подтверждения последнего и установления связи АЭ с гидродинамическими процессами в рабочей камере была изготовлена уменьшенная копия универсальной роторной установки с прозрачной рабочей камерой для возможности визуального наблюдения и видеосъемки (рисунок 4.8 Глава 4). Посредством этого удалось установить, что при непрерывном наборе оборотов до частоты вращения диска менее 1000 об/мин вода в ячейке остается прозрачная, как и при не вращающемся диске (рисунок 6.10а). При этом наблюдается вращение жидкости без явного перемешивания потоков. RMS АЭ в этом случае увеличивается пропорционально изменению числа оборотов ротора. Начиная со скорости вращения диска около 1000 об/мин происходит помутнение воды в рабочей камере и начинают выделяться белёдые

дорожки по диаметрам расположения активаторов на корпусе рабочей камеры (рисунок 6.10б). При локальном рассмотрении белёсые дорожки на кадрах видеозаписи представляют собой цепочки пузырьков.

Далее с увеличением оборотов помутнение воды и толщина белёсых дорожек увеличивается, что сопровождается и повышением уровня RMS АЭ, но уже не пропорционально изменению частоты вращения диска. Затем в пределах 3000÷5000 об/мин начинает наблюдаться перераспределение и смешивание потоков с образованием и срывом вихрей с активаторов рабочей камеры (рисунок 6.11), что отражается увеличением дисперсии RMS АЭ (большим разбросом значений относительно среднего уровня). Такой широкий диапазон перехода к вихреобразованию связан с сопутствующими факторами (температурой среды, скоростью ее прокачки через камеру и т.д.). Кроме этого, если скорость прокачки среды через рабочую камеру недостаточна, то за счет центробежной силы жидкость выдавливается из рабочей камеры и в ее центре образуется зона, заполненная воздухом. С увеличением оборотов воздушная зона растет и, когда достигает первого диаметра активаторов, то цвет жидкости резко изменяется до молочно-белого цвета с образованием вокруг активаторов на корпусе вихревых потоков (рисунок 6.10г). На данном режиме в кадрах высокоскоростной видеокамеры наблюдается самое большое количество воздушных пузырей в жидкости и высокий уровень RMS АЭ во время перехода с последующим его уменьшением.

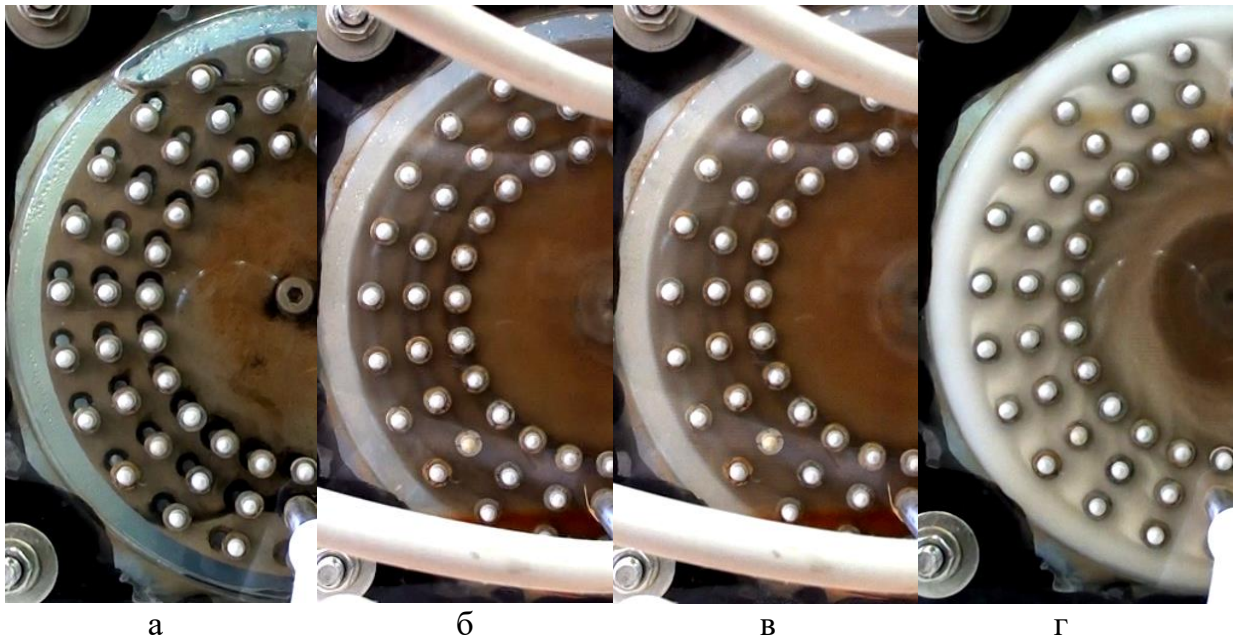


Рисунок 6.10 – Общий вид помутнения воды при частоте вращения диска с активаторами: 0 (а), 1300 (б) и 4600 (в и г) об/мин, где: (б), (в) – с принудительной циркуляцией воды через камеру, а (г) – нет.

Переход между указанными выше режимами течения жидкости сопровождается выделяющимися на фоне общего среднего уровня пиками RMS АЭ (рисунки 6.8 и 6.9), а именно переход: «перемешивание жидкости / начало ее раскручивания»; «вращение жидкости / начало перемешивания установившихся потоков с образованием вихрей»; «достижение воздухом активаторов / образование вихревых потоков». Поэтому здесь значения частот вращения ротора, которые совпадали с пиками RMS, были признаны критическими (переходными) точками. Однако, если при достижении пика RMS АЭ зафиксировать частоту вращения, то потоки жидкости быстро оптимизируются и пики RMS АЭ пропадают – выходят на постоянный уровень, сопровождающий работу установки на соответствующей частоте вращения (рисунок 6.8е). При этом установлено, что на некоторых зафиксированных режимах вращения диска (оборотах ротора) сохраняются локальные искажения токов жидкости и вихри в отдельных частях объёма (рисунок 6.11), но этого не отображает интегральный параметр RMS АЭ. Таким образом, интегральный оценочный параметр RMS АЭ оказался не чувствителен к интересующему нас режиму течения жидкости с образованием и отрывом вихрей от активаторов. Однако в работе [39] показано, что вихреобразование сопровождается акустическим излучением характерного спектрального состава, что является признаком возможности применения предлагаемого метода анализа шумоподобной АЭ в данном направлении.

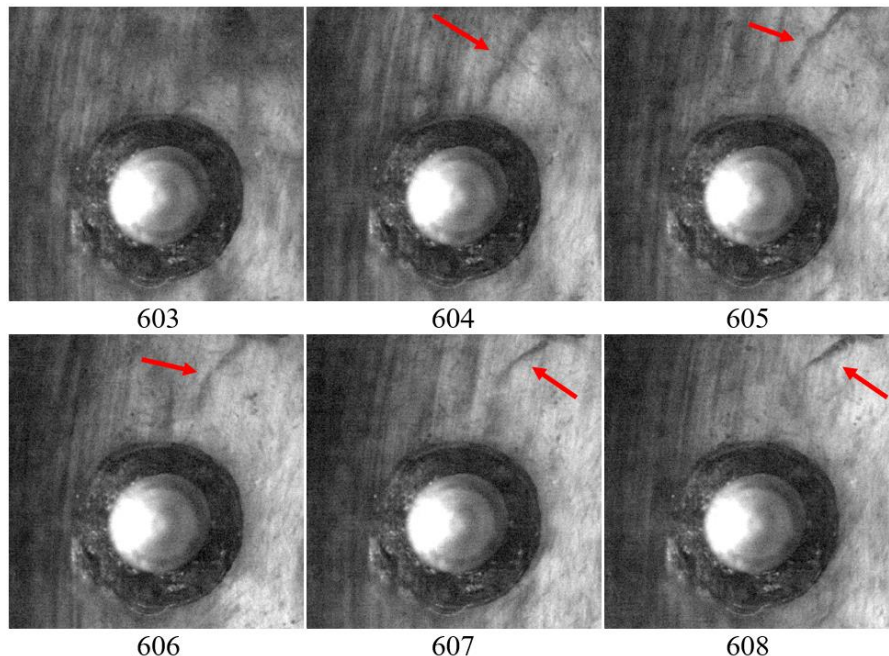


Рисунок 6.11 – Серия кадров, показывающая образование и отрыв вихря (красная стрела) от активатора при частоте вращения диска 4900 об/мин

Для разделения кадров записи АЭ на группы по степени схожести кривых их СПМ использовался алгоритм кластеризации $K1$ (п. 4.3.2.1 Глава 4). Перед сравнением кривые

СПМ нормировались по формулам (2.15) и (2.16). Во время кластеризации АЭ величина $[R\text{-квadrat}]$ подбиралась так, чтобы выделилась группа кадров АЭ, которая по времени регистрации совпадала бы со временем наблюдения вихрей в жидкости по результатам видеосъемки в экспериментах на уменьшенной копии универсальной роторной установки. В результате обработки АЭ данных в несколько итераций при $[R\text{-квadrat}] = 10, 30, 50$ и 80% было установлено, что указанная цель достигается при значениях $[R\text{-квadrat}] \geq 30\%$. При этом наилучший результат по условиям качества кластеризации АЭ данных (i)-(iii) п. 5.2.4 Главы 5 достигается при использовании схемы « $F1+f_{II}+K1$ », где: $F1$ – алгоритм спектрального вычитания, f_{II} – спектр шума работы роторной установки с пустой рабочей камерой. Общий вид изменения основных оценочных параметров АЭ полученный при $[R\text{-квadrat}] \geq 30\%$ показан на рисунках 6.12 – 6.14.

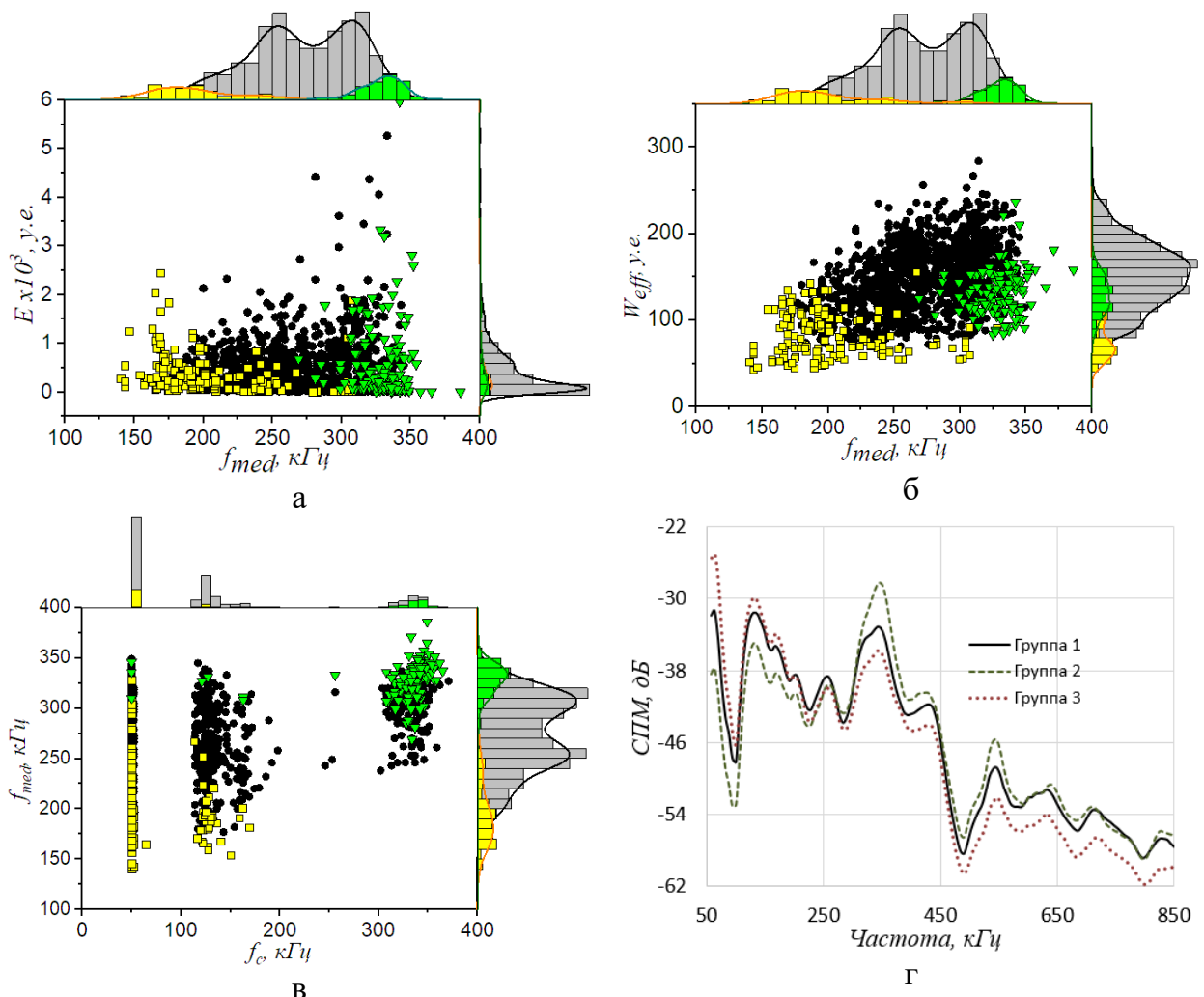
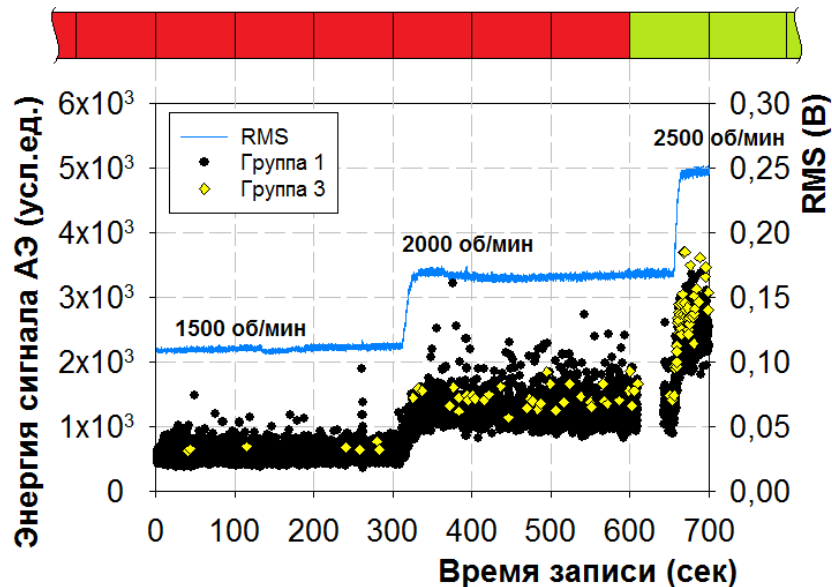
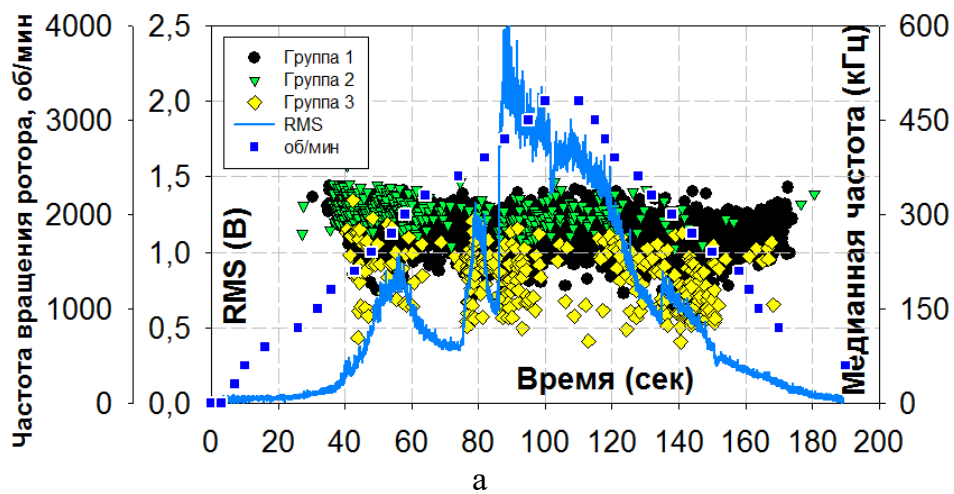


Рисунок 6.12 – Маргинальные гистограммы распределения основных оценочных параметров АЭ (а, б, в) кривые СПМ основных кластеров (г) полученные после применения схемы « $F1+f_{II}+K1$ ». Цветовая кодировка основных кластеров сигналов АЭ ●, ▽ и □ расшифрована в тексте

Установлено, что при использовании вышеописанной процедуры обработки кадры АВФ АЭ разделяются на 3 группы (●, ▽ и ■ - типа). При этом выявленным АЭ признакам вихреобразования соответствуют сигналы ■ - типа, которые наиболее активно регистрируются в переходные режимы (рисунке 6.13а) и количество которых увеличивается по мере увеличения числа оборотов диска (рисунке 6.13б), но до определенного числа оборотов, после достижения которого количество сигналов ■ - типа уменьшается. Последнее связано с тем, что с увеличением числа оборотов увеличивается и количество размещенного воздуха в жидкости, что приводит к уменьшению ее вязкости и невозможности дальнейшего существования эффективного режима обработки вихреобразованием.



б

Рисунок 6.13 – Пример разделения кластеров кадров АЭ при обработке жидкой среды путем разгона и торможения диска с активаторами (а) и на фиксированной частоте вращения диска (б)

Сопоставление данных акустических исследований с биологическими показали [251, А32], что эффект обеззараживания смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) достигался, когда за время наблюдения соотношение между количеством сигналов ●-типа к ■ - типу было: $N_{\bullet}/N_{\blacksquare} \leq 4$.

Таким образом, установлены два способа поддержания эффективного режима обработки жидких сред в рабочей камере роторного устройства с обратной связью по АЭ сигналам ■ - типа. Первый – путем периодического разгона/торможения ротора (рисунки 6.13а и 6.14), а второй – на фиксированной частоте вращения ротора (на рисунке 6.13б). Видно, что первый режим затратный по потреблению энергии, но «жесткий» по условиям обработки жидкости, второй – наоборот. Однако оба режима имеют право на существование, т.к. их выбор определяется особенностями технологической операции и ее влияния на качество продукта. На основании полученных результатов предложена и апробирована схема самонастраивающейся системы контроля режима обработки жидких сред в роторных устройствах с обратной связью по сигналам АЭ, которая показана на рисунке 6.15 и реализуется следующим образом.

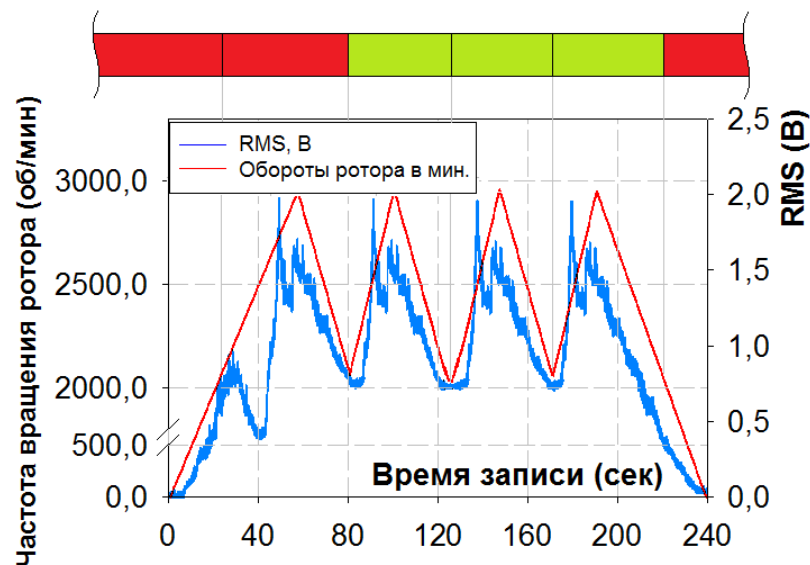


Рисунок 6.14 – Пример реализации способа обработки жидкой среды путем периодического изменения оборотов ротора

Оператором установки задается режим обработки жидкой среды: «температура» – если требуется предотвратить изменение качества среды, «расход» – если требуется повышение производительности, «длительность» – если требуется заданное количество операций обработки на единицу объёма. Далее для примера, рассмотрим режим обработки «расход», который применяется и для самообучения системы контроля (СК).

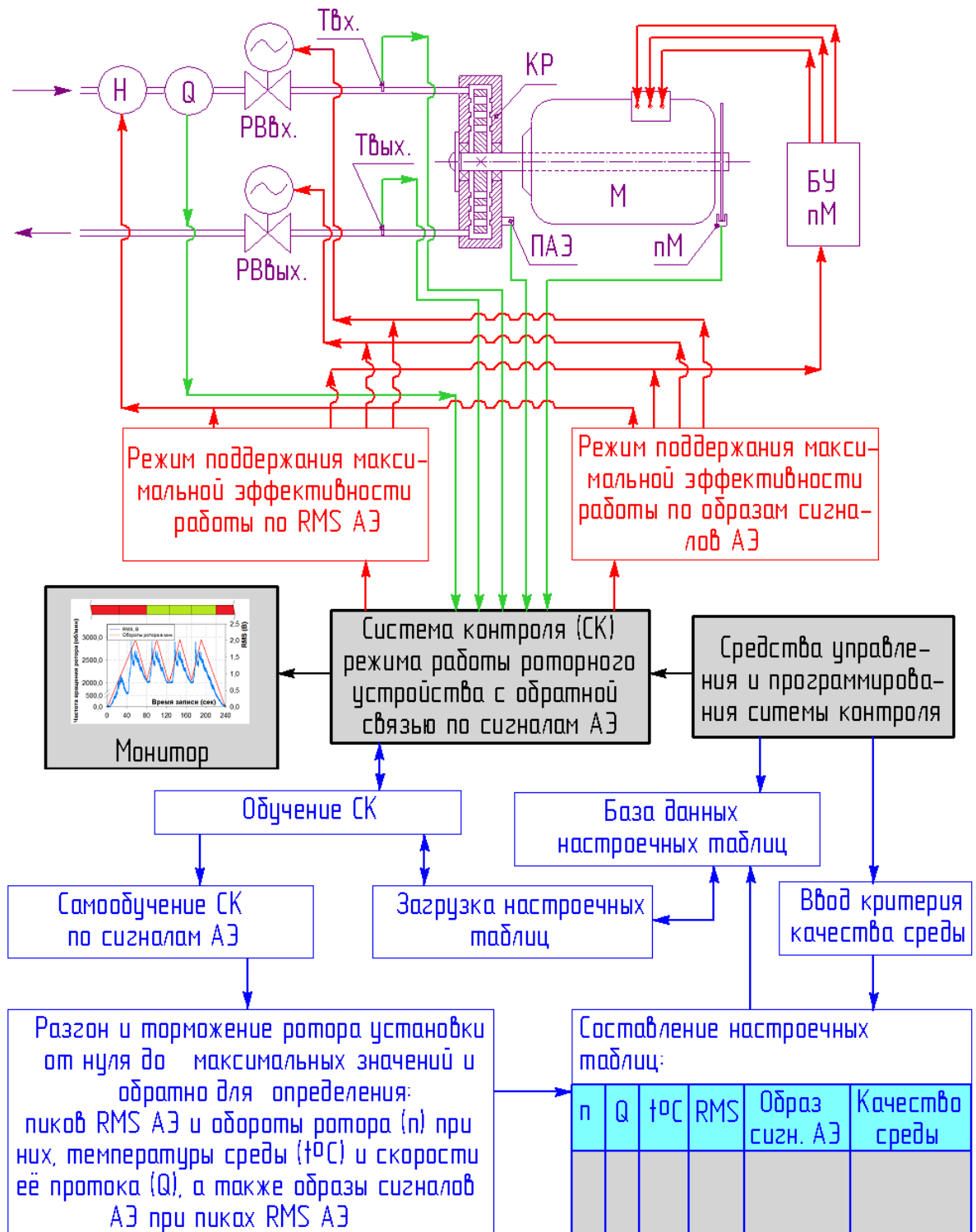


Рисунок 6.15 – Принципиальная схема системы контроля режима обработки жидких сред в роторных устройствах с обратной связью по сигналам АЭ. Обозначения расшифрованы в тексте.

При отсутствии базы данных АЭ признаков режима вихреобразования для конкретной среды или режима ее обработки СК начнёт самообучение путём последовательного регулирования проходного сечения в клапанах на входе «РВвх.» и выходе «РВвых.», ступенчато изменяя скорость прокачивания среды от минимума до

максимума. На каждой ступени скорости прокачивания среды проводится разгон и торможение ротора (рисунки 6.9 и 6.13а). Далее выделяются пики RMS АЭ, кластеры сигналов при них и составляются их АЭ признаки. Эти данные вместе с сопутствующими технологическими данными (температура среды, расход (скорость прокачки), частота вращения ротора) заносятся в строку настроечной таблицы (рисунок 6.15).

Далее процедура повторяется пока не будут перебраны все варианты. В случае, если какой-то режим приводит к ухудшению качества продукта, оператором в колонку «качество среды» настроечной таблицы вносится запрет на использование режима в виде знака «-». Знаком «+» в той же колонке помечаются наиболее предпочтительные режимы обработки, имеющие максимальное соотношение «качество/производительность», а неотмеченные – допускаемые режимы, но менее эффективные. После настройки СК (получения настроечной таблицы) оператор выбирает режим обработки: максимальной интенсивности (рисунок 6.13а и 6.14) или минимального потребления энергии (рисунок 6.13б).

Соответственно, в первом режиме СК поддерживает оптимальный режим обработки по подобию RMS АЭ путём регулирования расхода, а во-втором – по АЭ активности вихреобразования (по количеству регистрируемых сигналов заданной группы за время наблюдения – в рассматриваемом случае \square - типа). Необходимо отметить, что здесь и в представленных выше примерах группы сигналов с одинаковыми номерами могут иметь совершенно различный спектральный состав и АЭ признаки, т.к. программа обработки АЭ автоматически присваивает номер группе по количеству сигналов к ней отнесенных, т.о. первая группа имеет максимальное количество сигналов, вторая – меньше и т.д. Поэтому для каждой установки необходимо установить соответствие АЭ признаков групп (кластеров) контролируемым процессам. После чего контроль режима работы установки на основе поведения сигналов определенной группы становится работоспособен.

Оценим эффективность применения предлагаемого метода в данном направлении в сравнении с амплитудным пороговым АЭ методом. На основании вышеприведенных данных имеем диагноз D_1 – неэффективный режим обеззараживания СОЖ, диагноз D_2 – эффективный. Описание и характер изменения выбранных диагностических критериев приведены выше. Контрольная выборка для установления их границ применимости состояла из 44 испытаний. В которые входили 10 имитаций АЭ диагноза D_1 (на постоянных оборотах ротора – рисунок 6.13б) и 34 имитации диагноза D_2 (при наборе и сбросе оборотов ротора – рисунок 6.13а), т.е. $P(D_1) = 0,23$ и $P(D_2) = 0,77$. Диагностические признаки, их величины и априорная вероятность их наблюдения в данной серии

имитационных испытаний по I и II уровню обработки АЭ сведены в диагностические матрицы метода Байеса (таблицы 6.8 и 6.9).

Таблица 6.8

Диагноз $I.D_i$	Контрольные параметры I уровня обработки						$P(D_i)$
	- ■ -		$f_{med} \blacksquare$, кГц		$f_c \blacksquare$, кГц		
	+	-	< 250	≥ 250	< 100	≥ 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 (рисунок 6.12г) при $[R\text{-квадрат}] \geq 0,3$; «+» / «-» - присутствие / отсутствие кластера на временном отрезке оценки эффективности обработки СОЖ; $f_{med} \blacksquare$ и $f_c \blacksquare$ – медианная и центральная частота СПМ сигналов ■-типа (рисунок 6.12).

Таблица 6.9

Диагноз $II.D_i$	Контрольные параметры II уровня обработки						$P(D_i)$
	\bar{U} , В		$R\text{-квадрат}$		$\Delta\tau$, с		
	< 0,5	≥ 0,5	< 0,3	≥ 0,3	< 60	≥ 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 $\bar{U} \geq 0,5$; $R\text{-квадрат}$ – степень похожести кривой изменения \bar{U} опорной кривой при соответствующей $\Delta\tau$.

Таблица 6.10

D_i	Контрольные параметры III уровня обработки						$P(D_i)$
	$I.D_2$		$II.D_2$		$N \bullet / N \blacksquare$		
	+	-	+	-	< 4	≥ 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.

Эффект обеззараживания СОЖ [251, А32] достигался при значениях [$\blacksquare = \langle + \rangle$; $f_{med} \blacksquare < 250$ кГц; $f_c \blacksquare < 100$ кГц] на I уровне обработки АЭ данных и при [$\bar{U} \geq 0,5$ В; $R\text{-квадрат} \geq 0,3$; $\Delta\tau < 60$ с] на II уровне обработки АЭ данных. Применяя обобщенную формулу Байеса получаем априорные для III уровня анализа вероятности диагнозов D_1 и D_2 (таблица 6.10), где также подтверждается требуемое соотношение между количеством сигналов \bullet -типа к \blacksquare - типу. Итоговая апостериорная вероятность поддержания эффективного режима обработки СОЖ с применением предлагаемого метода [$I.D_2 = \langle + \rangle$; $II.D_2 = \langle + \rangle$; $N \bullet / N \blacksquare < 4$] равна: $P(D_2/III.D_2) = 0,999$. Эффективный режим обработки СОЖ пороговым АЭ методом по RMS наступает при [$\bar{U} \geq 0,5$ В; $\Delta\tau < 60$ с], а поддержание его по соответствующим диагностическим параметрам по таблице 6.9 возможно с вероятностью

$P^*(D_2/II.D_2) = 0,87$. Последнее является высоким показателем, но ниже в 1,15 раз (на 12,9%) по сравнению с результатом предлагаемого метода и для применения амплитудного порогового метода является предельным значением, т.к. достижим только если во время обработки не происходит изменения свойств обрабатываемой среды.

Также эффективность предлагаемого метода можно оценить по результатам микробиологических исследований обработки СОЖ на промышленной универсальной роторной установке, описание которой приведено в п. 4.1.5 Главы 4 в «эффективном» и «неэффективном» режимах [251, А32]. Микробиологические исследования проводились в лаборатории СОЖ УЛИР ОАО «АвтоВАЗ» по 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). В исследованиях использовалась СОЖ «Автокат Ф-40», которая накапливалась за 2 месяца эксплуатации на металлообрабатывающем участке ОАО «АвтоВАЗ» и имела поражение микроорганизмами в виде бактерий и грибов с концентрацией 10^6 и 10^3 КОЕ/мл соответственно. Результаты исследований показали, что уничтожение грибов происходит практически на всех режимах обработки СОЖ, а вот уничтожение бактерий только на «эффективном» режиме [251, А32]. Таким образом, применение предлагаемого метода позволяет достичь заявляемый результат с высокой степенью вероятности.

Из вышесказанного видно, что в данном практическом примере при первом режиме регулирования работы роторной установки применяется I, II и III уровень метода п. 2.4 Главы 2 (I уровень для подтверждения вихреобразования, II и III уровень для управления режимом обработки), а при втором режиме регулирования для обеих задач используются данные I и III уровня. При этом на III уровне по хронологическим лентам (верхняя часть рисунков 6.13б и 6.14) определяется реальная длительность обработки жидкой среды на заданном (эффективном) режиме, которая всегда меньше общей длительности обработки. Все основные результаты, полученные в рамках решения обозначенной задачи обсуждались на профильных конференциях [А29-А32, А34-А36, А43] и подробно освещены в следующих изданиях [251, А19, А20]. Кроме того, результаты исследований позволяют полагать, что система обратной связи на основе метода АЭ более устойчива, т.к. её эффективность меньше зависит от типа и режима работы роторной установки и свойств обрабатываемой среды, например, по сравнению с широко применяющимся для этих целей методом шумометрии.

Выводы по главе 6

В настоящей главе экспериментально показано, что решения, заложенные в предлагаемом методе анализа шумоподобной АЭ на основе ее спектрально-временного подобия с подтверждением результатов на трех иерархических уровнях, универсальны и показали работоспособность в нескольких принципиально различных направлениях применения метода АЭ. Основными результатами, полученными в данной главе, являются:

1. Экспериментально подтверждена возможность применения предлагаемого метода анализа АЭ для обнаружения критических точек трения и изнашивания узлов скольжения. Учет спектральных особенностей источников АЭ позволил 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, а также предложить новый научный подход, позволяющий: восстановить хронологию разрушения контактирующих материалов, сократить общее время трибологических испытаний и повысить ресурс узлов трения-скольжения.
2. Экспериментально показана возможность применения предлагаемого метода в направлении обнаружения сигналов от трения берегов усталостной трещины при ее циклическом нагружении. На основе результатов исследования разработана АЭ методика оценки степени поврежденности цапф сушильных цилиндров картоно- и бумагоделательных машин, которая при промышленной апробации при сравнении с данными УЗ контроля показала достоверность обнаружения трещин на уровне 73%, при вероятности их пропуска и перебраковки изделия 10 и 17% соответственно.
3. Экспериментально подтверждена работоспособность и исследованы границы применения разработанного способа повышения точности локализации шумоподобных АЭ источников. На реальном практическом примере контроля емкостного оборудования получено повышение вероятности локализации течи в 6,1 раз (на 33,6%) при 7-кратном снижении затрат по сравнению с применением амплитудного порогового метода.
4. Исследованы особенности проявления АЭ при обеззараживании водных растворов и установлены оптимальные режимы. Экспериментально показана эффективность применения метода АЭ в качестве системы обратной связи для управления режимом работы роторных перемешивающих установок и аппаратов по сравнению с методом звуковой шумометрии. Учет спектральных особенностей источников АЭ позволил

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.

5. Продемонстрирована работоспособность предлагаемого метода анализа шумоподобной АЭ с применением нескольких видов преобразователей, усилителей и плат аналого-цифрового преобразования (АЦП) разных производителей. Поэтому можно утверждать, что предлагаемый метод будет воспроизводим на аппаратуре, которая поддерживает stream-запись и обработку АЭ данных со следующими техническими параметрами записи и обработки АЭ: разрешение АЦП по амплитуде не хуже 0,036 дБ/1ед.АЦП (≈ 1 мкВ/1ед.АЦП); частотный диапазон регистрации АЭ не хуже 20÷400 кГц; алгоритм расчета спектральной плотности мощности (СПМ) - метод модифицированных периодограмм Уэлча при соотношении длины кадра к размеру оконной функции 8 с величиной смещения окна $\frac{1}{2}$ его длины (14 кадров усреднения СПМ); спектральное разрешение при расчете СПМ не хуже 0,38 кГц (достигается подбором длины фрейма и частоты дискретизации с учетом правила Котельникова/ Найквиста-Шеннона).

Глава 7. Разработка средств для контроля промышленных объектов, генерирующих шумоподобную акустическую эмиссию

7.1. Экспериментальный образец интеллектуальной системы мониторинга

Для апробации предлагаемого метода был собран экспериментальный образец интеллектуальной акустико-эмиссионной системы мониторинга (ЭО ИСМ АЭ) и контроля промышленных объектов, генерирующих шумоподобную АЭ. Внешний вид ЭО ИСМ приведен на рисунке 7.1а, а его технические особенности и характеристики приведены в п. 4.2.2 Главы 4. ЭО ИСМ собран на стандартной аппаратной базе – это промышленный компьютер защищенного исполнения с универсальной многоканальной платой аналого-цифрового преобразования. Поэтому в текущей версии ЭО ИСМ для записи АЭ используется стандартное программное обеспечение платы АЦП или данные, полученные на других АЭ системах и загружаемые в память устройства для их обработки и анализа.

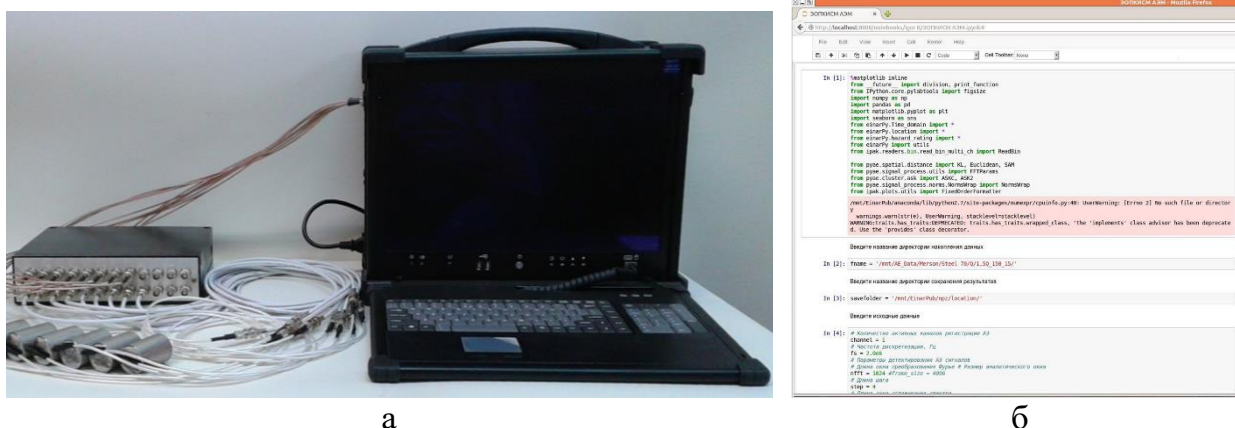


Рисунок 7.1 – Общий вид ЭО ИСМ с блоком развязки сигнал/питание и преобразователями АЭ повышенной надежности (а) и ЭО ПО ИСМ на базе шаблона в среде Python в режиме iPython notebook (б).

Для обработки АЭ данных по предлагаемому методу разработан экспериментальный образец программного обеспечения (ЭО ПО ИСМ). ЭО ПО ИСМ на текущем этапе развития темы реализован по модульному принципу, т.е. представляет собой последовательно исполняемые скрипты процедур: чтения данных, их конвертации, обработки по какому-то алгоритму, выгрузки и визуализации. Скрипты реализованы в математических пакетах MathLab, Octave и Python. Общее управление обработкой данных в соответствующих математических пакетах осуществляется с помощью шаблонов (рисунок 7.1б), в которых прописывается порядок загрузки, обработки и выгрузки данных. Скрипты ЭО ПО ИСМ реализуют алгоритмические решения,

предложенные в настоящей работе, но, поскольку написание программного кода не выполнялось автором, то они здесь не приводятся и в работе обсуждаются только результаты их применения для решения различных задач.

В Главе 1 показано, что шумоподобная АЭ сопровождает работу и дефектное состояние технологических объектов химических, нефтехимических, нефтеперерабатывающих производств и теплоэнергетики в виде статического оборудования (изотермические резервуары, резервуары нефти и нефтепродуктов, сосуды, аппараты, трубопроводы, котлы, печи и т.д.) и динамического оборудования (насосы, компрессоры, редукторы, роторные устройства, циклоны и т.д.). К последнему также относят емкостное оборудование, работающее в условиях циклического изменения нагрузки (адсорберы, реакторы, холодильные установки, блоки осушки, буферные емкости и т.д.). Также шумоподобная АЭ сопровождает работу объектов электроэнергетики в виде: статического (силовые трансформаторы) и динамического оборудования (ветреные генераторы). Кроме этого показано, что сегодня отдельной задачей стоит контроль режима работы и технического состояния силовых установок и приводов на основе поршневых двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных двигателей, а также силовые части грузоподъемных машин, буровых установок и экскаваторов в виде статических (стрелы, откосы, фермы и т.д.) и динамических (гидравлические приводы, редукторы, подвижные опоры и т.д.) элементов. Также известны задачи контроля отдельных основных элементов промышленного оборудования, без оценки технического состояния всего объекта, например, диагностика и контроль: подшипников скольжения или качения; загрузочных шнеков, зубчатых передач, цапф и т.д.

В условиях промышленного производства перечисленное оборудование и их элементы подвержены всему спектру климатического и технологического воздействия в виде: перепада (циклирования) температуры или статических высоких (низких) температур; наличия осадков, пыли, коррозионных или агрессивных сред; воздействия вибрации, ударной нагрузки или переменного-возникающего (компенсационного) перемещения, а также возможно присутствие на объекте статического или переменного электромагнитного и электрического полей. Из всех элементов АЭ аппаратуры контроля и мониторинга промышленных объектов наиболее нагруженными являются преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ), поскольку они устанавливаются стационарно непосредственно на объект контроля и поэтому подвержены всему вышеуказанному спектру негативного внешнего воздействия наравне с объектом

контроля. В связи с этим, к преобразователям АЭ, используемым для контроля и диагностики объектов, работающих в экстремальных окружающих условиях и/или генерирующих шумоподобные сигналы, выдвигаются повышенные требования надежности.

По данным коммерческих предложений основных производителей ПАЭ промышленного диапазона частот сегодня ни один из них не гарантирует работоспособность своих изделий более 1 года. Статистика эксплуатации систем АЭ мониторинга на изотермических резервуарах показывает, что порядка 10÷20% ПАЭ ежегодно теряет чувствительность или работоспособность и требует замены. Мало того, что данная операция весьма затратная, так как предполагает остановку производства и вывод оборудования из эксплуатации, так еще в промежуток времени до момента замены ПАЭ часть объекта, входящая в зону его ответственности, не контролируется, что влияет на безопасность эксплуатации всего промышленного объекта. Кроме этого из-за малой надежности ПАЭ применение метода АЭ невозможно там, где доступ к ним затруднен или отсутствует вовсе, или где они эксплуатируются в экстремальных условиях, например, на Крайнем Севере, внутри изотермических резервуаров, блоков разделения воздуха и т.д. Для решения этой проблемы и расширения сферы применения метода АЭ требуются ПАЭ повышенной надежности. Под последним понимается ресурс работы ПАЭ, сопоставимый со сроком службы объекта контроля или, хотя бы, с периодичностью его технического диагностирования, что на современном этапе развития конструкций ПАЭ является проблемным вопросом, требующим решения [252]. При этом нам не известны технические решения, в которых при разработке конструкции ПАЭ в приоритетные требования включали бы повышенную надежность. Анализ известных технических решений показал, что в основном при разработке ПАЭ основополагающими целями являются: повышение чувствительности, выравнивание частотной характеристики чувствительности, повышение помехоустойчивости и снижение собственных шумов и возможность определения координат источника акустической эмиссии (АЭ) одним ПАЭ [A21, A25]. В связи с этим в рамках настоящей работы для контроля любого вида промышленного оборудования, где выдвигаются повышенные требования к надежности датчиковой аппаратуры был разработан ПАЭ Повышенной Надежности (сокращенно ПАЭПН), работающий при температурах от -65 до +65 °С. Общий вид ПАЭПН приведен на рисунках 7.1 и 7.2. Рассмотрим его отличительные особенности.

7.2. Преобразователь акустической эмиссии повышенной надежности

Основная идея, заложенная при проектировании ПАЭПН, состояла в обеспечении повышенной изначальной надежности изделия и возможности управления ею в процессе применения/эксплуатации изделия. Обозначенный эффект был достигнут за счет применения следующего комплекса конструкторских мер: во-первых, устранение известных причин, приводящих к отказам [97, 253, А21, А25 др.], то есть сведение к минимуму или полной ликвидации, если это возможно, известных конструкторских, технологических и эксплуатационных ошибок; во-вторых, повышение надежности дублированием/резервированием основных рабочих систем и элементов; в-третьих, придание конструкции ПАЭ избыточных или расширенных технических возможностей, позволяющих компенсировать частичную или полную потерю работоспособности антенной группы (решетки). Общая схема и промышленный образец предложенной конструкции ПАЭПН представлены на рисунке 7.2.

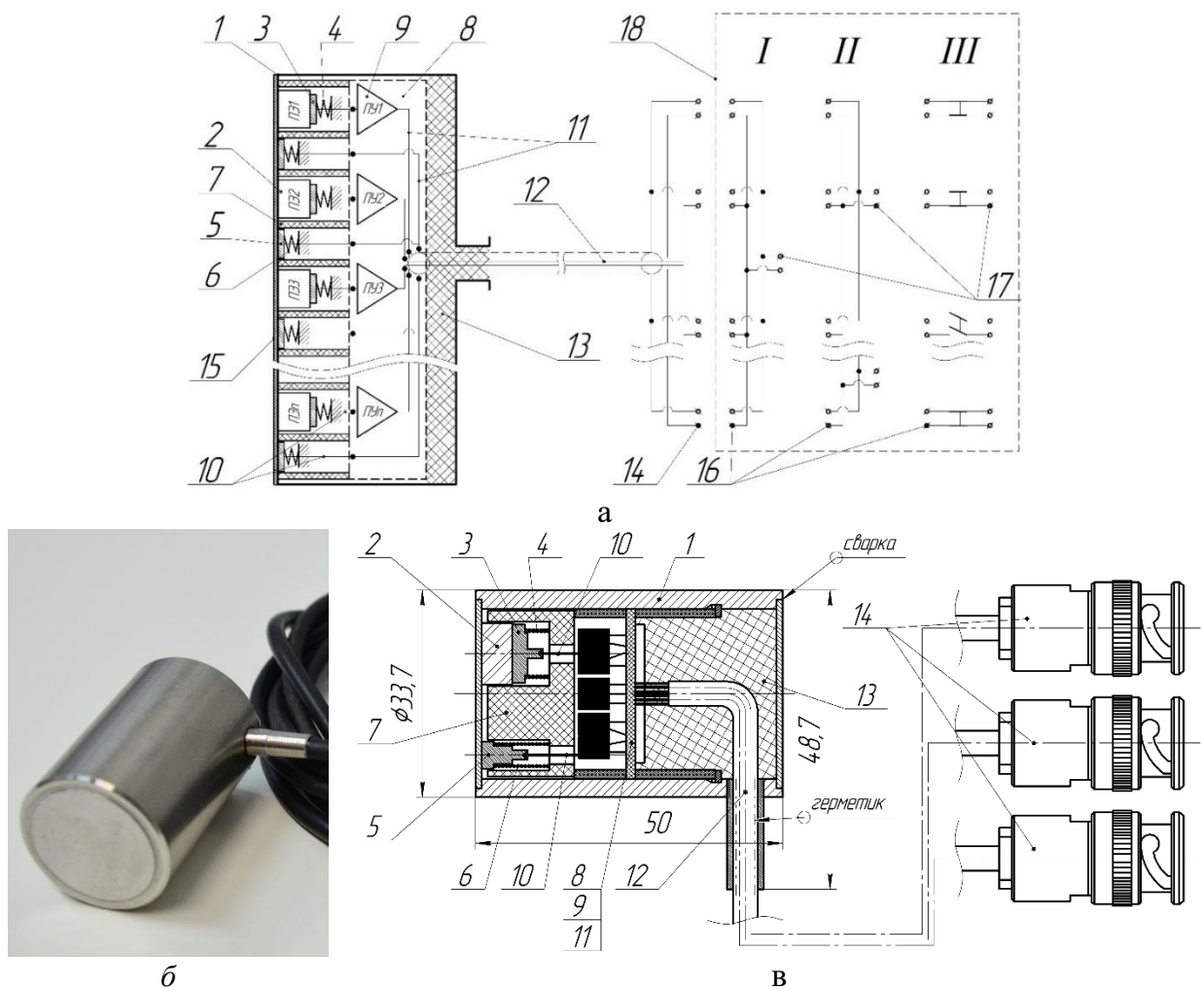


Рисунок 7.2 – Принципиальная схема многоканального Преобразователя Акустической Эмиссии Повышенной Надежности (а), его общий вид (б) и схема исполнения (в) в экспериментальном варианте с тремя дублирующими линиями.

На рисунке 7.2 обозначено: (1) – герметичный корпус из материала, стойкого к агрессивным средам; (2) – пьезоэлементы (ПЭ); (3) – прямые контакты ПЭ; (4) – упругий прижим прямых контактов; (5) – обратные контакты ПЭ; (6) – упругий прижим обратных контактов; (7) – неэлектропроводящие и акустически непрозрачные перегородки; (8) – общая плата предварительных усилителей (ПУ); (9) – ПУ; (10) – гибкие проводники; (11) – жесткие проводники на плате ПУ; (12) – кабельная линия подачи питания ПУ и передачи сигналов АЭ; (13) – компаунд; (14) – контактный разъем; (15) – неэлектропроводящий акустически прозрачный защитный (брекерный) слой; (16) – контактный разъем; (17) – разъемы или контакты управления режимом работы линией регистрации АЭ; (18) – блок развязки сигнал/питание (БРСП) или искробезопасный барьер или блок обработки информации (БОИ) АЭ-системы; I, II и III – способы подключения дублирующих линий ПАЭПН задающие режим его работы. Это и является основной отличительной особенностью разработки, а именно то, что в случае выхода из строя одной или двух дублирующих линий, или даже полностью всего ПАЭПН переключением режимов его работы или соседних преобразователей можно компенсировать частичную или полную потерю работоспособности антенной решетки [A21, A25]. При этом возможны следующие три основных режима работы ПАЭПН: I – суммирование сигнала в общей точке по всем дублирующим линиям ПАЭПН; II – суммирование сигнала в общей точке по нескольким дублирующим линиям и III – отдельный вывод сигнала по каждой дублирующей линии.

Порядок оценки вероятности потери работоспособности ПАЭПН на каждом рабочем режиме описан в Приложении Б, а результаты ее расчета для нескольких вариантов исполнения ПАЭПН и стандартной схемы ПАЭ на той же электронной базе сведены в таблицу 7.1. Также, в Приложении Б приведены технические характеристики, результаты испытаний и оценки работоспособности ПАЭПН при различных внешних воздействиях. По результатам исследований установлено, что основное влияние на рабочие характеристики ПАЭПН оказывает перепад температур. При этом работоспособность ПАЭПН в исследованном температурном диапазоне не может быть признана стабильной по следующим контрольным параметрам: коэффициент преобразования, полоса рабочих частот и средний ток потребления. Это несмотря на то, что во всем исследованном диапазоне температур они удовлетворяют предельным показателям, установленным [10, 95] и требованиями взрывозащиты. Из полученных результатов следует, что ПАЭПН может применяться в пределах исследованного диапазона температур, но только в статическом режиме (отклонение температуры

объекта контроля от своего номинального значения не более чем на 15 °С). При этом при настройке чувствительности АЭ системы отклонения контрольных параметров от 25 °С должны компенсироваться коэффициентами тарировки, которые могут быть получены из рисунка Б2 Приложения Б.

Таблица 7.1

Количество дублирующих линий в ПАЭПН и схема их подключения	Вероятность безотказной работы в течение 10 лет при рабочей температуре ПАЭПН, °С				
	65	25	0	– 35	– 65
Один стандартный ПАЭ с усилителем без дублирующих линий	0,2830	0,4124	0,4853	0,4483	0,3699
ПАЭПН с 3 дублирующими линиями, подключенными по схеме I	0,6315	0,7971	0,8636	0,8320	0,7499
Четыре ПАЭПН с 3 дублирующими линиями, подключенными по схеме I, при минимальном количестве рабочих ПАЭПН, равном двум	0,8551	0,9716	0,9908	0,9834	0,9491
ПАЭПН с 3 дублирующими линиями, подключенными по схеме III при одной рабочей и двух резервных линиях	0,8657	0,9394	0,9630	0,9522	0,9207
ПАЭПН с 4 дублирующими линиями, подключенными по схеме I	0,7358	0,8808	0,9298	0,9073	0,8424
ПАЭПН с 6 дублирующими линиями, подключенными по схемам I или II	0,8642	0,9588	0,9814	0,9718	0,9374
ПАЭПН с 6 дублирующими линиями, подключенными по трем ПЭ в одну рабочую и одну резервную линии по схемам II и III	0,9217	0,9778	0,9902	0,9850	0,9657
ПАЭПН с 9 дублирующими линиями, подключенными по схемам I или II	0,9499	0,9916	0,9974	0,9952	0,9843
ПАЭПН с 9 дублирующими линиями, подключенными по трем ПЭ в одну рабочую и две резервные линии по схемам II и III	0,9884	0,9983	0,9995	0,9990	0,9967

В целом полученные результаты исследований подтвердили оригинальность и работоспособность разработанных технических решений, поэтому конструкция ПАЭПН была запатентована (Приложение Е). Параллельно подтверждена степень защиты от пыли и влаги IP65 и IP67 по ГОСТ 14254-96, а также взрывозащита категории 1Ex ib IIA T3 Gb X (Приложение Ж). Также следует выделить, что при наличии искробезопасного барьера и блока развязки сигнал-питание ПАЭПН универсален, т.е. его возможно подключить не только к ЭО ИСМ, но и к существующей АЭ аппаратуре любого типа, например, A-Line (Интерюнис-ИТ, г.Москва), Малахит АС (ООО «НПФ «Диатон»), DiSP или Samos (Physical Acoustics Corporation, США), AMSY (Vallen Systeme, Германия) и т.д.

Из таблицы 7.1 следует, что управление режимом работы дублирующих линий ПАЭПН позволяет обеспечить заданный расчетный срок службы, т.е. обеспечить непрерывность контроля объекта порядка 10 лет в диапазоне температур от -65 до $+65$ °С с вероятностью безотказной работы на $37 \div 70$ % выше стандартных преобразователей АЭ, используемых сегодня. Между тем, из вышеприведенного описания конструктивного исполнения ПАЭПН видно, что он имеет несколько встроенных предварительных усилителей, поэтому его предельная рабочая температура ограничивается не точкой Кюри пьезоэлемента (какого вида он бы не был), а рабочей температурой электроники, что составляет ± 65 °С. Таким образом, он не пригоден для АЭ контроля и мониторинга промышленного оборудования выше $+65$ и ниже -65 °С. Поэтому для расширения области применения ПАЭПН требуется применение акустического волновода, который, по возможности, должен быть максимально универсален.

7.3. Универсальный акустический волновод

Акустический волновод, как элемент АЭ аппаратуры не был рассмотрен в п. 1.4 Главы 1, т.к. является дополнительным элементом и применяется в случаях, когда необходимо передавать сигнал АЭ от объекта контроля к ПАЭ на некоторое расстояние, гарантирующее допустимый рабочий температурный режим эксплуатации ПАЭ и/или его защиту от механического воздействия или поражения электрическим / электромагнитным полем [6, 254 и др.]. Проектирование акустического волновода заключается в согласовании (обеспечение баланса) между: температурным градиентом / акустическими потерями / геометрией волновода и удобством его применения. Подробный анализ конструкций акустических волноводов, а также проблемы распространения и преобразования акустических волн в их элементах рассмотрены в [A22, A27]. Обзор известных конструктивных решений показывает, что основным видом их исполнения являются стержневые конструкции, что обуславливается относительной простотой их расчета и согласования с ПАЭ и объектом контроля [254]. В работе [255] показано, что при одностороннем подводе тепла к стержневому волноводу температура по его длине изменяется по следующему закону:

$$t(l) = (t_{OK} - t_{OC}) \cdot e^{-ml}, \quad (7.1)$$

где: t_{OK} и t_{OC} – температура объекта контроля и окружающей среды соответственно; m – теплофизический коэффициент, учитывающий условия теплоотвода; l – длина волновода. Формула (7.1) симметрична, т.е. работоспособна, как при $\Delta t = (t_{OK} - t_{OC}) > 0$ (нагрев), так и при $\Delta t = (t_{OK} - t_{OC}) < 0$ (захолаживание). Из (7.1) видно, что при $\Delta t = const$

и $m = const$ (установившемся режиме теплообмена) для достижения рабочей температуры ПАЭ на втором конце волновода $t(l)$ необходимо увеличивать его длину (l). Такой подход приемлем только до определенной длины волновода, которая физически позволяет его монтаж и применение. Однако, чем больше градиент температур между концами волновода (Δt) и хуже условия охлаждения его середины (m), тем труднее обеспечить: стабильность рабочих характеристик волновода; отсутствие наводок и помех, а также компактность и удобство монтажа волновода. Поэтому при большой разнице (Δt) акустические волноводы имеют большие длины и привариваются к объекту контроля, что требует: разнесение места его приварки с другими сварными соединениями объекта контроля; прокладки трассы для волновода; разработку и согласование с надзорными службами проекта его приварки, а также поддержания условий его эксплуатации. Кардинально решить проблему эффективного теплорассеивания при обеспечении минимальной длины волновода позволяет его ребрение [255, 256]. В связи со всем вышесказанным был разработан универсальный прижимной акустический волновод, конструктивные особенности которого и варианты исполнения показаны на рисунке 7.3.

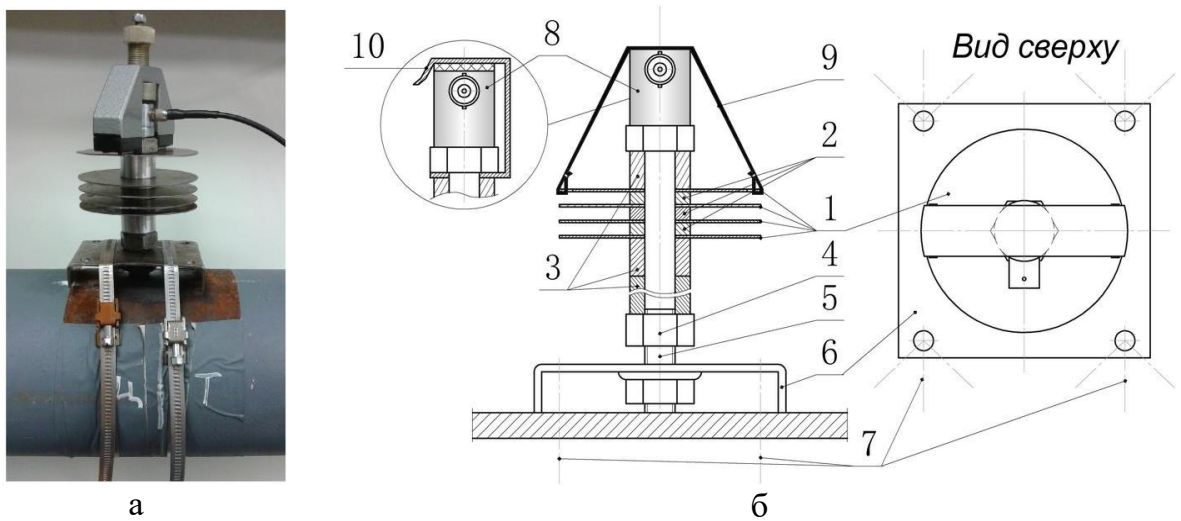


Рисунок 7.3 – Общий вид (а) и схема (б) опытного образца универсального акустического волновода

На рисунке 7.3 обозначены: (1) – дисковые рассеиватели тепла; (2) – дистанционные кольца; (3) – распорные кольца; (4) – фиксирующие элементы теплорассеивающего пакета, состоящего из позиций (1 ÷ 3); (5) – стержневой акустический волновод; (6) – основание-упор; (7) – крепежно-натяжительные элементы основания-упора; (8) – ПАЭ; (9) и (10) – варианты закрепления ПАЭ. При сборке между контактными поверхностями деталей позиций (1 ÷ 3) наносится теплопроводящая паста с максимальным акустическим

сопротивлением, между объектом контроля и (5) наносится акустически прозрачная высокотемпературная (низкотемпературная) контактная среда, а между (5) и (8) наносится обычная акустически прозрачная контактная среда. Фиксирующие элементы (4) теплорассеивающего пакета могут быть (Приложение В): цапгового или лепесткового вида; резьбового вида; пружинного вида; хомутами; стопорящими элементами, например, кольцами или в виде стяжки, которая может закрепляться на волноводе вышеописанными способами, магнитами или с помощью акустически непрозрачного клея.

Отличительными особенностями разработанной конструкции является возможность управления его теплорассеивающими характеристиками при минимальных акустических потерях в условиях заданной (ограниченной) длины [A22, A27]. Указанный положительный эффект достигнут путем применения накладных рассеивателей тепла, что минимизирует их акустическую связь с волноводом (основным акустическим каналом), а значит и меньше трансформация сигнала (по сравнению с рассеивателями тепла приваренными к волноводу или выполненными заодно с ним [255, 256]). Универсальность конструкции обеспечивает то, что теплорассеивающий пакет может применяться, как на стационарных (приварных) волноводах, так и передвижных (прижимных) и инвариантен к сечению акустического канала (круглое, квадратное, прямоугольное и т.д.). Учитывая, что прижимные волноводы не требуют согласование их применения на опасных промышленных объектах с надзорными службами и соблюдение специальных требований при их монтаже, а также позволяют многократное их использование, то данное конструктивное решение принято за основу. Здесь также является оригинальным предложенное техническое решение обеспечения усилия прижима волновода, которое обеспечивается в два этапа. Во время первого крепежно-натяжительными элементами (7) проводится установка волновода в рабочее положение и задается предварительное усилие прижатия основания-упора (6), во время второго вкручиванием волновода (5) в резьбу основания-упора (6) устанавливается окончательное усилие прижатия. Кроме этого устройство технологично, ремонтпригодно, разборно, компактно при транспортировке и хранении, и может быть легко переориентировано на другую температуру (объект контроля) путем изменения количества рассеивателей тепла. При этом размер рассеивателей тепла (1) задает площадь теплообмена, размер дистанционных проставок (2) – условие теплообмена, а материал элементов (1 ÷ 3) – скорость теплоотвода. Также в условиях естественной конвекции важен угол установки волновода относительно вектора силы свободного падения. Последнее перестает быть решающим в случае применения принудительных средств охлаждения (например,

вентиляторов), что также допускает конструктивное исполнение волновода. Однако минимальная шумность, стоимость и простота эксплуатации волновода может быть достигнута только в условиях пассивного теплообмена (естественная конвекция), поэтому в исследованиях его рабочих характеристик данный вариант рассматривается, как основной. В исследованиях определялись теплорассеивающие и акустические характеристики разработанного устройства.

Подробная описание результатов исследования основных эксплуатационных характеристик волновода приведены в Приложении В, а здесь лишь отметим следующее: по результатам исследований установлено, что при возможности обеспечения надежного жидкого контакта волновода с объектом контроля могут быть применены крепежно-натяжительные элементы любого типа. Если есть вероятность возникновения полусухого или сухого контакта (испаряется контактная среда при контакте с нагретым объектом контроля и т.д.), то требуется увеличить жесткость растяжек и основания-упора волновода. Промышленная апробация волновода (Приложение В) показала возможность настройки АЭ-системы, обеспечения условия локации и выполнения АЭ-контроль в полном соответствии с [10]. Также подтверждена универсальность волновода по отношению к способу его закрепления на объектах контроля различного вида, что позволяет реализовать монтаж волновода по всем схемам локации (зонной, линейной, планарной – рисунок 7.4). Путем варьирования типа и длины крепежно-натяжительных элементов возможно проводить подгонку и изменение антенной решетки под форму, размер и акустические характеристики объекта контроля. Важно также, что применение волновода не предъявляет никаких особых требований к ПАЭ разных АЭ систем, что было подтверждено при его апробации с системами Малахит АС-16А (ООО «НПФ «Диатон», г.Москва), DiSP и Samos (Physical Acoustics Corporation, США) и A-Line 32D (Интерюнис-ИТ, г.Москва). Таким образом, разработанный волновод позволяет расширить сферу применения метода АЭ в направлении экспресс-оценки технического состояния высокотемпературных (криогенных) объектов, как при диагностировании оборудования в режиме работы, так и перед выводом их из эксплуатации для технического освидетельствования (экспертизы промышленной безопасности) с целью определения активных (опасных) зон для дополнения их в программу контроля другими неразрушающими методами. Полученные результаты исследований подтвердили оригинальность и работоспособность разработанных технических решений, поэтому конструкция универсального волновода была запатентована (Приложение Е).

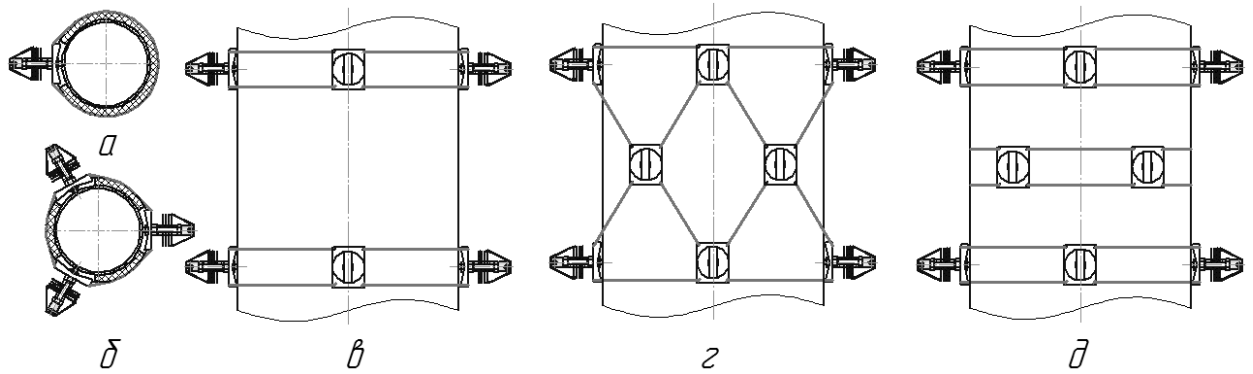


Рисунок 7.4 - Варианты крепления волновода с помощью проволочных растяжек: а – при линейной локации на сосуде или трубопроводе, б – при прямоугольной и треугольной локации на трубопроводе, в – при прямоугольной локации на сосуде, г и д – при треугольной локации на сосуде.

7.4. Универсальный учебно-исследовательский стенд изучения генерации и распространения сигналов АЭ

В п. 2.5.2 Главы 2 при получении опорных данных для детектирования критического состояния статического оборудования было предложено использование девяти имитаторов основных типов дефектов. Однако там же были обозначены ограничения, сдерживающие их применение на действующем промышленном оборудовании. Кроме этого, этап разработки любого алгоритма или методики обработки, или анализа АЭ данных, как и любых других, заканчивается подтверждением (верификацией) работоспособности разработанных решений (в общем случае) или оценкой их устойчивости к изменению внешних факторов (в частных случаях). Под верификацией понимают комплекс мероприятий по подтверждению посредством предоставления объективных свидетельств (истинных данных) о том, что установленные требования (обязательства, цели) были выполнены или достигнуты. В связи с этим в рамках настоящей работы был разработан универсальный учебно-исследовательский стенд (УУИС), общий вид которого представлен на рисунке 7.5. УУИС позволяет получать необходимый по объему и качеству массив опорных АЭ данных для контроля промышленных объектов ёмкостного типа, но в лабораторных условиях. Что снимает вопросы доступности оборудования, позволяет контролировать условия фонового шума на оборудовании при сохранении той же реалистичности и высокого подобия получаемых АЭ сигналов от основных физических источников их инициирующих. Обозначенный результат достигнут путем размещения всех указанных в п. 2.5.2 Главы 2 имитаторов АЭ (тип I – IX) на трех макетах, имитирующих основные (наиболее распространенные) типы статического оборудования, а именно макеты: объемного, линейного и плоскостного оборудования со следующей логикой.

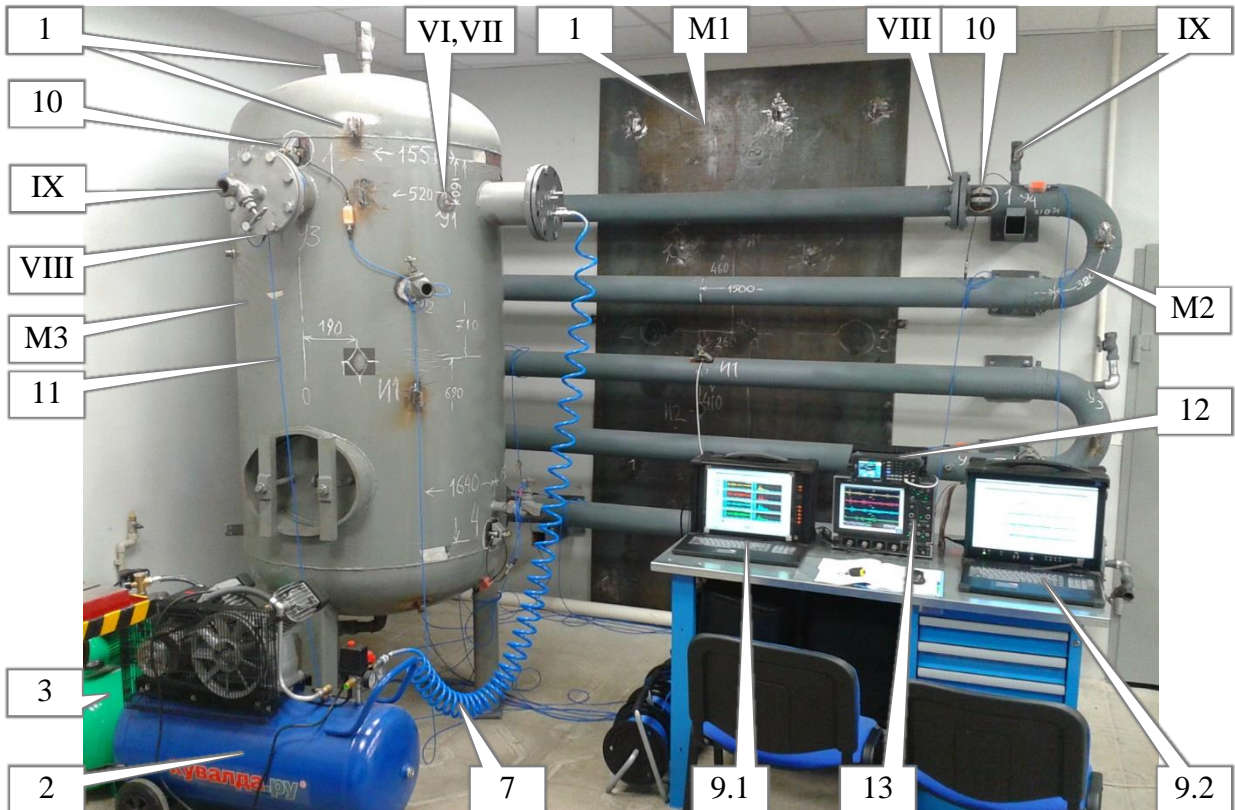
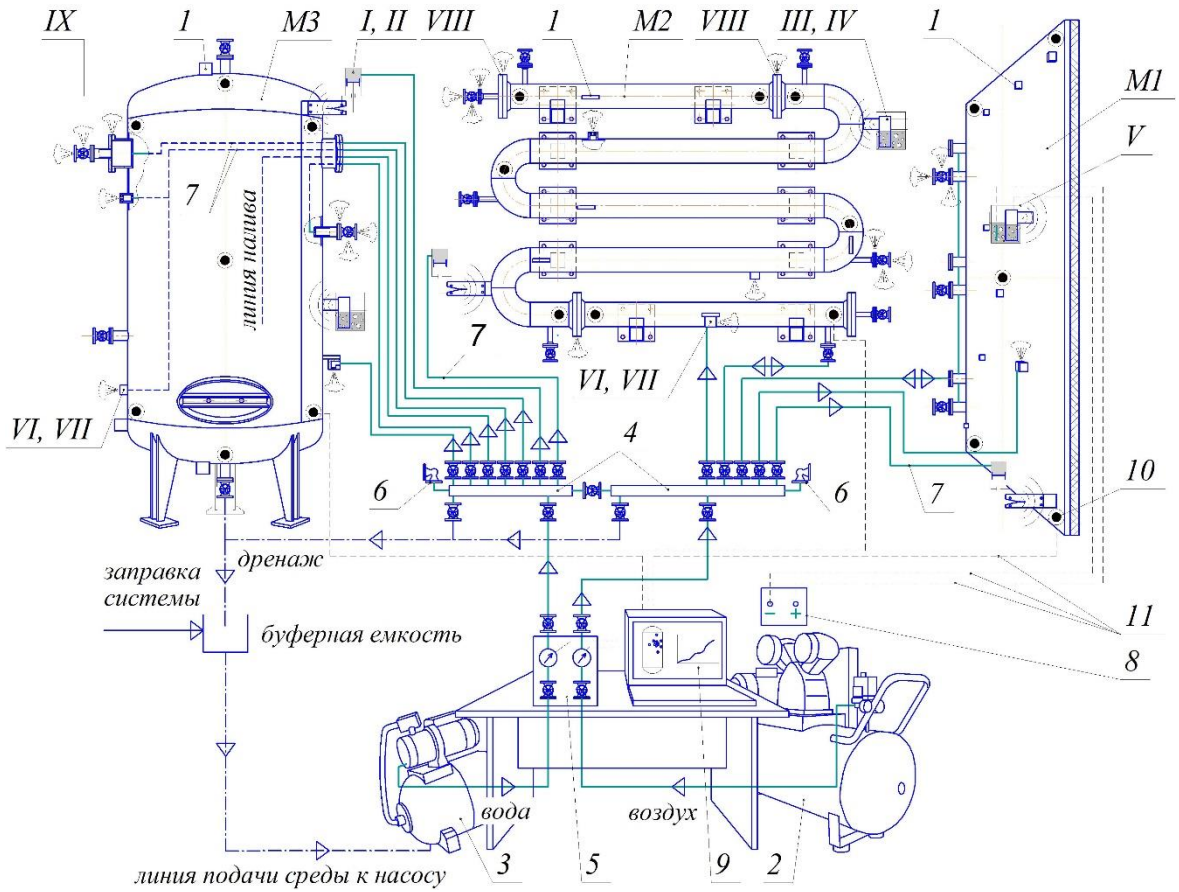


Рисунок 7.5 – Схема и общий вид универсального учебно-исследовательского стенда изучения генерации и распространения сигналов АЭ (УУИС).

М1). Макет плоскостного статического оборудования – объект, в котором сигнал АЭ распространяется преимущественно в плоскости и затухает раньше, чем успевает обогнуть весь объект. Макет представляет собой лист металла со сварными швами или без них и имитирует фрагмент объектов контроля в виде: резервуаров стальных сварных, прямоугольные емкости, хранилища, газгольдеры и др. крупнотоннажное оборудование.

М2). Макет линейного статического оборудования – это объект, в котором сигнал АЭ распространяется преимущественно по линии, при этом сигнал АЭ до затухания успевает несколько раз обогнуть объект по сечению, но не по длине. Макет представляет собой трубопровод со сварными и фланцевыми соединениями и имитирует фрагмент объектов контроля в виде: технологические и магистральные трубопроводы, трубы печей, подогревателей, котлов, экономайзеров и т.д.

М3). Макет объемного статического оборудования – объект, в котором сигнал АЭ распространяется преимущественно в плоскости и до затухания успевает обогнуть объект в различных направлениях несколько раз. Макет представляет собой сосуд высокого давления и имитирует объекты типа: воздухохранилища, ресиверы, адсорберы, цистерны, деаэратеры и др.

На рисунке 7.5 обозначено: М1 ÷ М3 – макеты статического оборудования соответствующего вида; I ÷ IX – имитаторы АЭ соответствующего вида (см. п. 2.5.2 Главы 2); 1 – пластины-волноводы для крепления имитаторов АЭ типа I ÷ VI (см. п. 2.5.2 Главы 2); 2 – компрессор с ресивером; 3 – насос с гидроаккумулятором; 4 – раздаточные коллекторы с запорными вентилями; 5 – блок регулировки давления с цифровыми манометрами; 6 – предохранительные клапаны; 7 – гибкие трубопроводы высокого давления; 8 – источник постоянного тока; 9 – АЭ система (9.1 – эталонная, 9.2 – тестируемая с экспериментальными алгоритмами анализа АЭ данных. В данном случае ЭО ИСМ – см. п. 7.1); 10 – преобразователи АЭ; 11 – электрические провода; 12 – генератор импульсов; 13 – цифровой осциллограф.

Для имитации ситуации распространения акустических волн внутри объекта контроля при наличии в них жидкого продукта в макетах объемного и линейного статического оборудования предусмотрена возможность заполнения их водой. Здесь оригинальным решением является отглушение изнутри штуцеров макетов с подключением к отглушенной полости трубопроводов подачи рабочей среды от нагружающего устройства. При этом трубопроводы прокладываются внутри макетов (рисунок 7.5), что без нагружения корпуса макетов статического оборудования позволило

на УУИС реализовать имитаторы АЭ течи в разъемные соединения (VIII и IX п. 2.5.2 Глава 2).

Подробное описание имитаторов УУИС приведено в п. 2.5.2 Главы 2, а особенности технического исполнения элементов в [А4, А26], поэтому здесь лишь отметим, что стенд, способы и устройства имитации АЭ заложенные в нем позволяют его применение для:

- исследования физических принципов излучения АЭ различными источниками;
- исследования распространения, затухания и трансформации сигналов АЭ на элементах промышленного оборудования;
- исследования работоспособности (верификации) алгоритмов фильтрации, шумоподавления и детектирования АЭ сигналов при различном соотношении сигнал/шум;
- исследования работоспособности (верификации) алгоритмов локации источников АЭ и отсеивания ложных локационных событий при различном соотношении сигнал/шум;
- аттестации и оценки чувствительности методик и аппаратуры АЭ контроля к нормируемому для обнаружения дефекту или группе дефектов при различном соотношении сигнал/шум;
- подготовки и аттестации специалистов НК по применению метода АЭ для контроля промышленного оборудования опасных производственных объектов.

Полученные результаты исследований подтвердили оригинальность и работоспособность разработанных технических решений, поэтому конструкция универсального учебно-исследовательского стенда и имитаторы АЭ были запатентованы (Приложение Е).

Выводы по главе 7

1. В рамках создания экспериментального образца интеллектуальной системы мониторинга проработаны программные модули и требования к АЭ системе, необходимые для реализации предлагаемого метода иерархического анализа шумоподобных сигналов.
2. Впервые разработан преобразователь АЭ, отличающийся от известных аналогов тем, что позволяет компенсировать потерю работоспособности дублирующих линий или соседнего преобразователя в антенной группе за счет переключения собственного режима работы. Исследованы его характеристики и показано, что внедренные технические решения позволяют обеспечить непрерывность контроля объекта

порядка 10 лет в диапазоне температур от -65 до +65 °С с вероятностью безотказной работы на $37 \div 70$ % выше стандартных преобразователей АЭ.

3. Впервые разработан универсальный акустический волновод, отличающийся от аналогов тем, что имеет накладные рассеиватели тепла разборной конструкции. Исследованы его характеристики и показано, что внедренные технические решения позволяют повысить температуру применения волновода в $1,5 \div 2,1$ раза по сравнению с гладким стержнем той же длины при сопоставимых акустических потерях.
4. Впервые разработан универсальный учебно-исследовательский стенд, отличающийся тем, что позволяет имитировать действие восьми основных видов повреждений статического емкостного оборудования и проводить: исследование физических основ излучения и распространения АЭ волн; оценку работоспособности алгоритмов, методов и аппаратуры детектирования и анализа АЭ, а также подготовку и аттестацию специалистов АЭ контроля.

Заключение

На основании выполненного в рамках диссертационной работы анализа текущих областей применения метода АЭ, а также результатов исследований, направленных на дальнейшее его развитие, сделан вывод о том, что для раннего обнаружения источников АЭ и их идентификации с минимальной вероятностью ошибки необходим анализ сигналов на уровне непрерывной (шумоподобной) АЭ, сопровождающей работу промышленного оборудования, т.е. амплитудой ниже уровня порога амплитудной дискриминации. Следовательно, существенного повышения чувствительности метода АЭ можно ожидать только при переходе на беспороговые алгоритмы записи и обработки АЭ. Хотя в настоящей работе подходы к детектированию АЭ сигналов на уровне или ниже уровня окружающих шумов в беспороговом режиме записи АЭ только научно обсуждаются и не имеют законченных технических решений, пригодных для практического применения, но сделан качественный скачок вперед. В работе подробно рассмотрены основные источники АЭ шумоподобного типа, их особенности и мировой опыт их обнаружения, исследования и применения. Результаты показали, что шумоподобная АЭ является самостоятельным объектом исследования, на базе анализа которой возможна выработка диагностических признаков в направлении оценки технического состояния промышленных объектов, работающих в условиях: циклирования нагрузки, механического контактного взаимодействия элементов,

химической агрессивности среды, электромагнитного воздействия и интенсивного движения жидких (газообразных) сред, что способствует существенному расширению спектра направлений промышленного применения метода АЭ. Также было установлено, что при формировании одинаковых внешних или внутренних факторов действуют одинаковые источники АЭ; единые по физической природе источники и процессы генерируют сигналы АЭ со схожим спектральным составом; количество возможных одновременно действующих источников АЭ ограничено, и они развиваются стадийно и циклически (имеют закономерности); итоговое АЭ излучение в каждый момент времени отражает суперпозицию волн от всех источников, но основной вклад вносят доминирующие (основные) из них.

На основании полученных данных была выдвинута основная идея и гипотезы работы. Идея, заключающаяся в том, что идентификация критических точек повреждения элементов оборудования возможна путем отслеживания изменения вида спектральной кривой, непрерывно регистрируемой АЭ. В качестве рабочей гипотезы было принято, что диагностические АЭ признаки повреждений элементов у работающего оборудования могут проявляться на трех временных масштабах равных: длительности сигнала (I уровень), длительности цикла нагружения (II уровень) и определенной наработке (III уровень). Выполненное теоретическое исследование подтвердило возможность создания методик обнаружения критических точек на основе отслеживания спектрально-временного подобия АЭ при условии: применения средств широкополосной записи и обработки АЭ; наличия опорных (эталонных) АЭ признаков источников и допустимой величины отклонения от подобия им. Полученные данные позволили разработать метод трехуровневого анализа шумоподобной АЭ и сигналов на уровне шума, а также методы получения опорных (эталонных) АЭ признаков основных видов повреждений, возникающих на статическом и динамическом оборудовании.

Для практической реализации и апробации предложенного метода были проанализированы и экспериментально исследованы: пять частотно-временных преобразований, два спектральных алгоритма шумопонижения, три алгоритма классификации АЭ данных и два критерия оценки степени опасности. В результате в основу метода для анализа АЭ на разных уровнях был положен вариант на базе преобразования Фурье с шумопонижением спектральным вычитанием и оценкой: подобия формы кривой спектральной плотности мощности АЭ сигналов на I уровне; подобия формы изменения среднеквадратичного значения или огибающей амплитуды (энергии) АЭ на II уровне и подобия частоты проявления на III уровне анализа АЭ.

Предложенный метод был апробирован при решении реальных практических задач, а именно при: лабораторных сравнительных исследованиях вариантов применения смазочных и контактирующих материалов в узлах трения-скольжения для идентификации времени начала схватывания и задира контактных поверхностей; ранжировании цапф сушильных цилиндров по степени их поврежденности усталостными трещинами для сокращения объема полного технического диагностирования картоноделательных машин в капитальный ремонт; поиске места течи рабочей среды в днище резервуара хранения щелочи в условиях ограниченной контролепригодности другими методами неразрушающего контроля; поддержании режима обеззараживания смазочно-охлаждающих жидкостей в роторной установке.

По совокупности всех проведенных работ можно сформулировать следующие основные 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. Экспериментально показано, что 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 подобию 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.

Анализ совокупности результатов выполненных задач, поставленных в ходе выполнения работы, позволяет сделать вывод, что цель диссертационной работы достигнута.

В заключении хочу выразить искреннюю благодарность своему научному консультанту Дмитрию Львовичу Мерсону за время, помощь, переданные знания и бесценный опыт, а также за познавательные беседы. Данная работа также состоялась во многом благодаря поддержке и участию заместителя директора НИИПТ ТГУ по науке Алексея Юрьевича Виноградова. Кроме того, хотелось бы выразить признательность сотрудникам НИО-2, НИО-4 и НИО-6 НИИПТ ТГУ, которые в разное время помогали работать над материалами диссертации. В особенности, Александру Александровичу Разуваеву, Eraldo Romponi, Алексею Валерьевичу Данюку и Эйнару Альбертовичу Аглетдинову за помощь в создании модулей программного обеспечения без которых была бы невозможна апробация предложенного метода. Хочу выразить благодарность

Всем соавторам публикаций и патентов за помощь в получении исходных данных и многие часы дискуссий и обсуждений результатов их анализа, особенно: директору физико-технического института ТГУ Анатолию Алексеевичу Викарчуку; директору ООО «ЛАЭС» Александру Константиновичу Хрусталеву; директору ООО «Диагност» Петру Николаевичу Зорину; инженеру ООО «НПФ «Промэкспертиза» Алексею Владимировичу Чугунову; инженеру ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез (КИНЕФ)» Виктору Петровичу Гомере; сотрудникам лаборатории технической диагностики Филиала АО «Группы ИЛИМ» в г.Коряжма (Котласский ЦБК): Дмитрию Васильевичу Севастьянову, Александру Дмитриевичу Плюснину и Сергею Витальевичу Мелентьеву.

Отдельное и огромное спасибо моей жене, дочке и двум её дедушкам и бабушкам за заботу, помощь, терпение, понимание и поддержку.

Список определений, обозначений и сокращений

- ОПО** – опасные производственные объекты, под которыми в работе понимаются технические устройства или промышленное оборудование, предназначенное для выполнения технологического процесса в химической, нефтехимической или нефтеперерабатывающей промышленности;
- Шумоподобная АЭ** – одномерные случайные акустические широкополосные сигналы без явно выраженной формы имеющие узкий динамический диапазон изменения во временной области, но стационарную спектральную функцию в частотной области вид которой определяется физической природой источника сигналов и свойствами среды его передачи. В связи с этим статистические характеристики шумоподобных сигналов зависят от физического источника, генерирующего их, но могут быть четко описаны спектральными параметрами.
- Шумоподобный объект контроля** – объект контроля, работа или испытание которого сопровождается генерацией шумоподобной АЭ (трибологические, аэрогидродинамические, электромагнитные процессы и устройства);
- Источник шумоподобной АЭ** – локальная область объекта контроля, в которой происходит преобразование какого-либо вида энергии в акустическую с образованием сигналов шумоподобного вида;
- Доминирующий источник генерации АЭ** – источник или механизм повреждения объекта контроля, который по мощности или интенсивности в фиксированный момент времени наблюдения превалирует над всеми остальными, а, следовательно, вносит основной вклад в зарегистрированный сигнал АЭ;
- КТ** – критическая точка, под которой понимается идентифицируемая точка на кривой изменения какого-то оценочного параметра от времени, которая свидетельствует о смене одного доминирующего источника генерации АЭ или механизма повреждения объекта контроля на другой.
- Спектрально-временное подобие АЭ** – повторяемость проявления доминирующего источника генерации АЭ установленная по результатам оценки степени подобия спектральных характеристик АЭ заданному (эталонному) виду (сигналу источника) с помощью статистических мер и критериев (расстояния, расхождения или правдоподобия), и представленная в хронологическом порядке регистрации данных.

Список литературных источников

1. Drouillard, T.F. A history of acoustic emission / T.F. Drouillard // Journal of Acoustic Emission. – 1996. – 14(1). – С. 1 – 34.
2. Неразрушающий контроль. Россия, 1900 – 2000 гг.: Справочник / Под. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2001. – 612 с.
3. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий / В.А. Грешников, Ю.В. Дробот – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 276 с.
4. ГОСТ Р 55045-2012. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Термины, определения и обозначения. – М.: Стандартиформ, 2019.
5. ГОСТ Р ИСО 12716-2009. Контроль неразрушающий. Акустическая эмиссия. Словарь. – М.: Стандартиформ, 2011.
6. Акустико-эмиссионная диагностика / В.И. Иванов, В.А. Барат – М: Спектр, 2017.–368с.
7. Иванов, В.И. Об истории развития метода акустико-эмиссионной диагностики / В.И. Иванов // Территория NDT. – 2019. – 1. – С. 44-51.
8. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. / Л.Р. Ботвина – М.: Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН – Изд-во:«Наука», 2008.–334с.
9. Ботвина, Л.Р. Оценка и анализ b-параметра акустической эмиссии / Л.Р. Ботвина, Т.Б. Петерсен, М.Р. Тютин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. – 3 (77). – С. 43-50
10. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.– М.: ПИО ОБТ, 2019.
11. СА 03-008-08. Резервуары вертикальные стальные сварные для нефти и нефтепродуктов. Техническое диагностирование и анализ безопасности (Методические указания) – М: Ростехэкспертиза, 2009.
12. Ченцов, В.П. История исследования акустической эмиссии в Хабаровске / В.П. Ченцов // Территория NDT. – 2019. – 3. – С. 50-55.
13. Панин, В.И. Вклад сотрудников хабаровского филиала ВНИИФТРИ в развитие метода акустической эмиссии и его метрологического обеспечения / В.И. Панин // Территория NDT. – 2019. – 4. – С. 58-63.
14. Акустические и электрические методы в триботехнике / А.И. Свириденко, Н.К. Мышкин, Т.Ф. Калмыкова и др.– Минск:Наука и техника, 1987. –280 с.
15. Акустическое контактное течеискание / Ю.Б. Дробот, В.А. Грешников, В.Н. Бачегов – М.: Машиностроение, 1989. – 120 с.
16. Акустическая эмиссия при трении / В.М. Баранов, Е.М. Кудрявцев, Г.А. Сарычев, В.М. Щавелин – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 256 с.

17. Wu, Z. Overview of Published Papers on Acoustic Emission in the World from 2005 to 2011 / Z. Wu, G. Shen, Z. Hu, J. Zhang, R. Wang, L. Li // Proceedings of World Conference on Acoustic Emission, Beijing. – 2011. – С.569-574.
18. Иванов, В.И. Применение метода акустической эмиссии для неразрушающего контроля и исследования материалов (обзор основных проблем и задач) / В.И. Иванов // Дефектоскопия. – 1980. – 5. – С. 65-84.
19. Руководство по безопасности. Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах. – М.: ЗАО НТБ ПБ, 2016. – Серия 27. – Выпуск 16.
20. Acoustic Emission – Beyond the Millenium / T. Kishi, M. Ohtsu, S. Yuyama, eds. – Elsevier, 2000. – 213 с.
21. Иванов, В.И. Вопросы оценки риска аварии с использованием технического диагностирования / В.И. Иванов, Н.Н. Коновалов, В.С. Котельников и др. // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 3. – С.12-20.
22. Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики: Монография / Буйло С.И. – Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. – 184 с.
23. Шумы при измерениях / А. Ван дер Зил. Пер. с англ. Под ред. А.К. Нарышкина. – М.: Мир, 1979. – 292 с.
24. Federal Standard 1037C. Telecommunications: Glossary of Telecommunications erms. – U.S. General Services Administration. Information Technology Service, 1996.
25. Мерсон, Д.Л. Применение метода акустической эмиссии в физическом материаловедении. Глава 12 / Перспективные материалы: Структура и методы исследований: Учеб. пособие. под. ред. Д.Л. Мерсона.–ТГУ,МИСиС,2006–С. 417-456.
26. Гомера, В.П. К вопросу о раннем диагностировании расслоений в стенках сосудов давления ультразвуковым и акустико-эмиссионным методами / В.П. Гомера, И.А. Растегаев // Контроль. Диагностика.–2015.–1.–С. 82-89.
27. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении/Н.А. Семашко, В.И. Шпорт, Б.Н. Марьин и др.–М.: Машиностроение, 2002.–240с.
28. Акустическая диссипация энергии при термоупругих мартенситных превращениях / А.И. Потекаев, В.А. Плотников –Томск: НТЛ, 2004. – 196 с.
29. РД 03-299-99. Требования к аппаратуре акустической эмиссии, используемой для контроля опасных производственных объектов. – М.: НТЦ ПБ, 2019.

30. Лапшин, Б.М. Разработка и применение акустико-эмиссионных течеискателей / Б.М. Лапшин, А.Л. Овчинников, А.С. Чекалин // В мире неразрушающего контроля. – 2009. – 2 (44). – С. 18-22.
31. Elizarov, S. UNISCOPE: Instrument Integrating NDT Methods. In Springer Proceedings in Physics, / S. Elizarov, V. Bardakov, A. Shimanskiy et al. // Springer Science and Business Media, LLC. – 2019. – С. 65-74.
32. Kaewwaewnoi, W. Measurement of Valve Leakage Rate using Acoustic Emission / W. Kaewwaewnoi, A. Prateepasen, P. Kaewtrakulpong // Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. – 2005. – С. 3-6.
33. Yoon, D.B. Improvement of Cross-Correlation Technique for Leak Detection of a Buried Pipe in a Tonal Noisy Environment / D.B. Yoon, J.H. Park, S.H. Shin // Nuclear Engineering and Tehnology. – 2012. – 44(8). – С. 977-984.
34. Лапшин, Б.М. Корреляционный течеискатель с вертикальной антенной решеткой для поиска утечек в подводных трубопроводах / Б.М. Лапшин, А.Л. Овчинников // Дефектоскопия. – 2012. – 2. – С. 32-39.
35. Фирсов, А.А. Алгоритм повышения точности локации при корреляционном течеискании, основанной на анализе функции фазы взаимного спектра / А.А. Фирсов, Д.А. Терентьев // Контроль. Диагностика.–2014.–8. –С. 23-27.
36. Бородин, Ю.П. Акустико-эмиссионный контроль котлов вагонов-цистерн / Ю.П. Бородин, С.В. Елизаров, В.А. Шапорев, В.Г. Харебов // Контроль. Диагностика. – 2006. – 5. – С. 53-58.
37. Гомера, В.П. Повышение достоверности АЭ-контроля оборудования, содержащего внутренние устройства / В.П. Гомера, А.Д. Смирнов, Е.Ю. Нефедьев // В мире Неразрушающего контроля. – 2014. – 3 (65). – С. 20-24.
38. Патент RU 2408868. Способ регистрации включений твердых фракций в газовом потоке / В.Г. Диденко, С.Г. Лазарев, А.Ю. Виноградов и др. // ООО «Очаг» 2009. Опубликовано 10.01.2011 Бюл. № 1.
39. Кавитация в перемешивающих устройствах: Монография / А.Я. Исаков, А.А. Исаков. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2006. – 206 с.
40. Чудина, М. Шум как индикатор кавитации в центробежном насосе / М. Чудина // Акустический журнал. – 2003. – 49(4). – С. 551-564.
41. Акустико-эмиссионный контроль дефектов сварки / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов и др. – Новосибирск: Наука, 2018. – 272 с.
42. Carmi, R. Detection Of Transient Zones During Water Boiling By Acoustic Emission / R. Carmi, A. Bussiba, G. Widenfeld, Y. et al. // Journal of Acoustic Emission. – 2011. – 29. – С. 89-97.

43. Linderov, M. Deformation mechanisms in austenitic TRIP / TWIP steels at room and elevated temperature investigated by acoustic emission and scanning electron microscopy / M. Linderov, C. Segel, A. Weidner et al. // *Materials Science & Engineering A*. – 2014. – 597. – С. 183-193.
44. Кузнецов, Д.М. Изучение кинетики растворения электролитов методом акустической эмиссии / Д.М. Кузнецов, В.Л. Гапонов, Т.В. Моргунова, Ю.А. Скрипина // *Физико-химический анализ свойств многокомпонентных систем*. – 2008. – 6. – 7с.
45. Исследование физико-химических процессов в жидкости акустико-эмиссионным методом: Монография /В.Л. Гапонов, Д.М. Кузнецов–Ростов на Дону:Донской государственный технический университет, 2011.– 88 с.
46. Кузнецов, Д.М. Акустический способ контроля электрохимических процессов / Д.М. Кузнецов, В.Л. Гапонов, М.С. Коробков, П.Н. Козаченко // *Инженерный вестник Дона*. – 2014. – 2(29). – С. 13.
47. Харебов, В.Г. Автоматизированные системы комплексного коррозионного мониторинга и перспективы применения метода АЭ в их составе / В.Г. Харебов, Ю.С. Попков // *В мире Неразрушающего Контроля*. – 2008. – 3(41). – С. 14-17.
48. Fukui, K. Visualization of Damage Progress in Solid Oxide Fuel Cells / K. Fukui, S. Akasaki, K. Sato, J. Mizusaki, K. Moriyama, S. Kurihara, M. Numao // *Journal of Environment and Engineering*. – 2011. – 6(3). – С. 499-511.
49. Гапонов, В.Л. Метрологические аспекты параметров акустической эмиссии при мониторинге разложения пероксида водорода / В.Л. Гапонов, Д.Л. Кузнецов, М.С. Захарова // *Вестник ДГТУ*. –2016. –1(84). –С. 160-166.
50. Коррозия и защита от коррозии / И.В. Семенова, Г.М. Флорианович, А.В. Хорошилов – М.: Физматлит, 2002. – 336 с.
51. Определение характеристик надежности и технического состояния оборудования сероводородсодержащих нефтегазовых месторождений / Н.А. Гафаров, А.А. Гончаров, В.М. Кушнаренко – М.: Недра-Бизнес-центр, 2001. – 239 с.
52. Tscheliesnig, P. Detecting corrosion during inspection and maintenance of industrial structures using acoustic emission / P. Tscheliesnig, A. Jagenbrein, G. Lackner // *Journal of Acoustic Emission*. – 2016. – 33. – С. S253-S259.
53. Merson, E.D. Effect of strain rate on acoustic emission during hydrogen assisted cracking in high carbon steel / E.D. Merson, M.M. Krishtal, D.L. Merson et al.// *Materials Science and Engineering A*. – 2012. – 550. – С. 408 - 417.
54. Терентьев, Д.А. Новые методы применения нормальных волн при контроле тонкостенных объектов больших геометрических размеров. Часть 2. Интегральная

- толщинометрия / Д.А. Терентьев, А.В. Жуков // В мире Неразрушающего контроля. – 2011. – 3(53). – С. 68-70.
55. Эмиссионная технологическая диагностика. Библиотека технолога / А.А. Барзов – М.: Машиностроение, 2005. – 384 с.
56. Tscheliesnig, P. Acoustic Emission Monitoring on Transport Products [Электронный ресурс] / P. Tscheliesnig // Proceedings of EWGAE-ICAE, 2012. – https://www.ndt.net/article/ewgae2012/content/papers/28_Tscheliesnig.pdf.
57. Emilianowicz, K. Monitoring of underdeck corrosion by using acoustic emission method / K. Emilianowicz // Polish Maritime Research. – 2014. – 21 (1/81). – С. 54-61.
58. Pimentel, J. Damage monitoring on a steel truck trailer using parameter-based analysis of Acoustic Emissions / J. Pimentel, R. Klemm, M. Dalgic, A. Irretier, K.-L. Krieger // Journal of Acoustic Emission. – 2018. – 35. – С. S54-S61.
59. Farhat, S.A. Combustion Oscillations Diagnostics in a Gas Turbine Using an Acoustic Emissions / S.A. Farhat , M.K. Al-Taleb // Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. – 2010. – 4(3). – С. 352 - 357.
60. Zhen, D. Acoustic measurements for the combustion diagnosis of diesel engines fuelled with biodiesels / D. Zhen, T.Wang, F. Gu1, B. Tesfa, A. Ball // Measurement Science and Technology. – 2013. – 24(5). – 055005. – 13 с.
61. Souza, F.C. Acoustic emission assessment of measurement errors caused by gaps in chemical composition analyzes carried out using a portable spark spectrometer / F.C. Souza, S.D. Franco , R.V. Arencibia et al. // Measurement. – 2019. – 107105.
62. ГОСТ Р ИСО 22096-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Метод акустической эмиссии. – М.Стандартинформ, 2016.
63. Стадниченко, В.М. Диагностика процессов изнашивания фрикционных узлов трансмиссий авиационных ГТД методом АЭ / В.М. Стадниченко // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов.–2010.–1(61).–С.108-117.
64. Фирсов, А.В. Диагностика дефектов подшипников качения при стендовой доводке малоразмерного высокооборотного газотурбинного двигателя с помощью спектрального анализа вибрации / А.В. Фирсов, В.В. Посадов // Контроль. Диагностика. – 2013. – 7. – С. 40-47.
65. Mba, D. Detection of shaft-seal rubbing in large-scale power generation turbines with acoustic emissions: case study / D. Mba, A. Cooke, D. Roby, G. Hewitt // Journal of Power and Energy. – 2004. – 218(2). – С. 71-81.

66. Волковас, В. Применение акустической эмиссии для регистрации трещинообразования в крыльчатках турбонасосных агрегатов / В. Волковас, И. Дулявичус // Дефектоскопия. – 2006. – 4. – С. 43-52.
67. Костюков, В.Н. Система контроля технического состояния машин возвратно-поступательного действия / В.Н. Костюков, А.П. Науменко // Контроль. Диагностика. – 2007. – 3. – С. 50-59.
68. Оксень, Е.И. Исследование особенностей сигналов акустической эмиссии, возникающих в кинематических парах двигателя при работе со знакопеременными нагрузками / Е.И. Оксень, В.Г. Цокур, Д.Е. Оксень // Двигатели внутреннего сгорания. – 2007. – 1. – С. 141-146.
69. Kaul, B. Engine Diagnostics Using Acoustic Emissions Sensors / B. Kaul, B. Lawler, A. Zahdeh // SAE International Journal of Engines. – 2016. – 9(2). – С. 684-692.
70. Mazal, P. Actual possibilities of damage evaluation of machines with rotating parts by acoustic emission / P. Mazal, L. Nohal, F. Hort // Journal of Acoustic Emission. – 2014. – 32. – С. S52-S59.
71. Елизаров, С. В. Акустико-эмиссионный контроль динамического оборудования на примере роликовых опор вращающихся печей / С.В. Елизаров, В.А. Барат, В.В. Бардаков и др. // Контроль. Диагностика. – 2017. – 7. – С. 4-11.
72. Муравьев, В.В. К возможности диагностирования рельсов в эксплуатации акустико-эмиссионным методом / В.В. Муравьев, М.В. Муравьев, Т.В. Муравьев // Дефектоскопия. – 2008. – 1. – С. 42-50.
73. BOLLAS, K. Anastasopoulos Acoustic emission inspection of rail wheels / K. BOLLAS, D. Papasalouros, D. Kourousis et al. // Journal of acoustic emission. – 2010. – 28. – С. 215-228.
74. Kosnik, D.E. Review of Acoustic Emission Source Mechanisms on Large Movable Structures / D.E. Kosnik // Journal of Acoustic Emission. – 2017. – 34. – С. S1-S9.
75. Mazal, P. Some possibilities of AE signal treatment at contact damage tests of materials and bearings / P. Mazal, F. Hort, M. Drab, T. Sluneko // Journal of Acoustic Emission. – 2008. – 26. – С. 189-198.
76. Do, V.T. Adaptive Empirical Mode Decomposition for Bearing Fault Detection / V.T. Do, L.C. Nguyen // Journal of Mechanical Engineering. – 2016. – 62(5). – С. 281-290.
77. Фадин, Ю.А. Определение износа узлов трения в процессе их эксплуатации / Ю.А. Фадин, О.Ф. Киреенко // Вестник машиностроения. – 2004. – 3. – С. 27-32.
78. Тарабан, В.В. Нелинейные зависимости интегрального показателя акустической эмиссии (трения) от нагрузочного давления для смазок с присадками

- наноструктурированных металлов / В.В. Тарабан, А.Г. Сырков, Д.С. Быстров и др. // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2009. – 11(4). – С. 337-342.
79. Jamaludin, N. Monitoring extremely slow rolling element bearings: Part I and Part II / N. Jamaludin, D. Mba // *NDT&E International*. – 2002. – 35(6). – С. 349-366.
80. ГОСТ Р 52034-2003. Изоляторы керамические опорные на напряжение свыше 1000 В. Общие технические условия / М.: Госстандарт России.
81. Boinet, M. Maximovitch Understanding aluminum behaviour in aqueous alkaline solution using coupled techniques. Part II: Acoustic emission study / M. Boinet, J. Bernard, M. Chatenet, F. Dalard, S. Maximovitch // *Electrochimica Acta*. – 2010. – 55. – С. 3454–3463.
82. Regularities and features of acoustic emission under plasma electrolytic oxidation of wrought Al-Mg alloy / I.A. Rastegaev, A.V. Polunin // *Journal of Physics: Conference Series*. - 2021. - 2144. – 012020.
83. Santos Filho, O.G. Case Studies of Electric Power Equipment Diagnostics Using Acoustic Emission / O.G. Santos Filho, S.L. Zaghetto, G.O. Pereira // *WCNDT*. – 2008. – <https://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/304.pdf>.
84. Cichon, A. The Application of the Selected Time–Frequency Descriptors Detection of the Acoustic Emission Signals Generated by Multisource Partial Discharges / A. Cichon // *Acta Physica Polonica A*. –2009. –116 (3).–С.290-293.
85. Chen, C.Y. Comparison and analysis of on-line partial discharge measurement methods for gas insulation substation / C.Y. Chen, C.C. Tai, J.C. Hsieh, C.C. Su, J.C. Chen // *Proceedings of A-PCNDT*. – 2006. – <https://www.ndt.net>.
86. Takamine, H. Internal Damage Detection of RC Bridge Decks with Uniformly Distributed Elastic Wave Sources / H. Takamine, Y. Ueda, K. Watabe, K. Hashimoto, T. Shiotani// *Journal of Acoustic Emission*.–2019.–36.–С. S67-S72.
87. Granier, C. Visualization of internal damage in RC slab with single side access attenuation tomography / C. Granier, T. Shiotani, K. Hashimoto, T. Nishida // *Journal of Acoustic Emission*. – 2017. – 34. – С. S54-S58.
88. Барат, В.А. Метод статистической обработки данных акустико-эмиссионного мониторинга на примере реактора гидроочистки Мозырского НПЗ / В.А. Барат, А.Л. Алякритский // *В мире неразрушающего контроля*. – 2008. – 4. – С. 52-55.
89. Петерсен, Т.Б. Автоматическая обработка данных и принятия решений при выполнении АЭ-мониторинга опасных объектов химической и нефтехимической промышленности / Т.Б. Петерсен, А.Б. Самохвалов, В.В. Шемякин // *В мире Неразрушающего контроля*. – 2014. – 2(64). – С. 32-35.

90. Герике, Б.Л. Буянкин Оценка технического состояния несущих металлоконструкций шагающих экскаваторов по параметрам акустико-эмиссионного сигнала / Б.Л. Герике, С.И. Протасов, А.В. Менчугин, П.В. Буянкин // Горное оборудование и электромеханика. –2009. –5. –С. 25-30.
91. Tsopelas, N.K. Acoustic Emission for Structural Integrity Assessment of Wind Turbine Blades / N.K. Tsopelas, D.G. Papasalouros, A.A. Anastasopoulos et al. // Advances in Acoustic Emission Technology. Springer Proceedings in Physics, Springer, NY, 2015. – Том 158. – С. 369-382.
92. Бардаков, В.В. Особенности применения метода акустической эмиссии при мониторинге мостовых конструкций / В.В. Бардаков, В.А. Барат, Д.А. Терентьев, и др. // Контроль. Диагностика. – 2016. – 1. – С. 32-39.
93. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Д. Баркли – М.: Машиностроение, 1986. – 360 с.
94. Терентьев, Д.А. Обзор аппаратных решений в многоканальных системах акустической эмиссии / Д.А. Терентьев, С.В. Елизаров, А.Л. Алякритский и др. // Территория NDT. – 2020. – 07-09. – С. 58-66.
95. РД 03-300-99. Требования к преобразователям акустической эмиссии, используемой для контроля опасных производственных объектов. – М.: НТЦ ПБ, 2018.
96. Nondestructive Testing Handbook. 2-nd Ed. Volume 5: Acoustic Emission Testing / R.K. Miller, R.C. McMaster. Ed. by P. McIntire. – American Society for Nondestructive Testing, Columbus OH, USA, 1987. – 604 с.
97. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарапова – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
98. Rodgers, M. The Use of a Floating Threshold for Online Acoustic Emission Monitoring of Fossil High Energy Piping: Newsletter / M . Rodgers // Acoustic Emission Consulting. – 1994. – 1.0. – 6 с.
99. Cole, P. Use of advanced AE analysis for source discrimination using captured waveforms / P. Cole, S. Miller / 3rd Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition, 2005.
100. Stachel, P. Enhanced Segmentation of Disturbance Records by Adaptive Thresholding / P. Stachel, R. Zivanovic, P. Schegner // Proceedings of Power Systems Computation Conference (PSCC'08), 2008.
101. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, В.В. Ивлиев и др. – Новосибирск: Наука, 2011. – 272 с.

102. Муравьев, В.В. Применение новой методики обработки сигналов АЭ для повышения точности локализации дефектов / В.В. Муравьев, М.В. Муравьев, С.А. Бехер // Дефектоскопия. – 2002. – №8. – С.53-65.
103. Bai, F. Comparison of alternatives to amplitude thresholding for onset detection of acoustic emission signals / F. Bai, D. Gagar, P. Foote, Y. Zhao // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2017. – 84. – С. 717-730.
104. Ito, K. High sensitivity detection of AE events in noisy environment using stream recording and parallel computation / K. Ito, M. Enoki // Journal of Acoustic Emission. – 2016. – 33. – С. 109-122.
105. Baensch, F. Nonthreshold Acoustic Emission analysis of damage evolution in pipe segments of steel S355J2H under bending load / F. Baensch, W. Baer, P. Wossidlo, A. Habib // Journal of Acoustic Emission. – 2018. – 35. – С. 233-240.
106. Кузьмин, А.Н. Технология беспороговой регистрации данных акустической эмиссии при контроле промышленных объектов / А.Н. Кузьмин, В.В. Иноземцев, А.С. Прохоровский и др. // Химическая техника. – 2018. – 3. – С.10-17.
107. Patonin, A.V. A Modular System for Continuous Recording of Acoustic Emission for Laboratory Studies of Rock Destruction Processes / A.V. Patonin, N.M. Shikhova, A.V. Ponomarev, V.B. Smirnov // Seismic Instruments. – 2019. – Том 55. – С. 313–326.
108. Скальский, В.Р. Особенности программного обеспечения АЭ средств диагностирования. Обзор. Часть 1 и Часть 2 / В.Р. Скальский, О.М. Станкевич, Б.П. Клим, Э.П. Почапский // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2010. – 3. и 4. – С. 5-13. и 16-23.
109. Wadley, H.N.G. Acoustic Emission for Materials Processing: a Review / H.N.G. Wadley, R. Mehrabian // Materials Science and Engineering. – 1984. – 65. – С.245-263.
110. Недзвецкая, О.В. Котоломов Количественные оценки возможностей неразрушающего контроля на базе явления акустической эмиссии / О.В. Недзвецкая, Г.А. Буденков, А.Ю. Котоломов // Дефектоскопия. – 2001. – 5. – С. 50-67.
111. Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики / Г.А. Буденков, О.В. Недзвецкая – М.: Издательство физико-математической литературы, 2004. – 136 с.
112. Разрушение. В 2 кн. Кн. 1. Разрушение материала: монография / М.А. Штремель – М.: Изд. Дом МИСиС, 2014. – 670 с.
113. Rauscher, F. Laboratory experiments for assessing the detectability of specific defects by acoustic emission testing /F. Rauscher//Journal of Acoustic Emission.–2008.–26.–С.98-108.

114. Ono, K. Acoustic Emission. Chapter 30 in book Springer Handbook of Acoustics / Ed. T.D. Rossing, Springer, 2014. – С. 1209-1229.
115. Буденков Г.А. Технические возможности бесконтактного акустического метода течеискания / Г.А. Буденков, О.В. Недзвецкая, Е.Г. Булатова // Дефектоскопия. – 1996. - №12. – С. 48-53.
116. Акустическая эмиссия при деформировании монокристаллов тугоплавких металлов. / О.В. Гусев – М.: Наука, 1982. – 108 с.
117. Горбунов, А.И. Спектральные характеристики акустических сигналов при усталостных испытаниях образцов / А.И. Горбунов, Ю.И. Лыков, В.Н. Овчарук // Дефектоскопия. – 1985. – 10. – С. 81-83.
118. Абрамов, О.В. Обратная задача акустико-эмиссионной диагностики материалов / О.В. Абрамов, О.М. Градов, М.И. Юдин // Акустический журнал. – 1988. – 34(6). – С. 961-968.
119. Маленко, П.И. Исследование методом акустической эмиссии поверхностей трения в условиях смазывания / П.И. Маленко // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2011. – 13(2). – С. 164-171.
120. Бойко, В.С. Элементарные дислокационные механизмы акустической эмиссии / В.С. Бойко, В.Д. Нацик. В кн.: Элементарные процессы пластической деформации кристаллов. – Киев: Наукова думка, 1978. – С. 159-189.
121. Муравин, Г.Б. Идентификация механизма разрушения материалов методами спектрального анализа сигналов акустической эмиссии / Муравин Г.Б., Симкин Я.В., Мерман А.И. // Дефектоскопия. – 1989. – 4. – С. 8-15.
122. Псахье, С.Г. Изучение поведения и диагностика свойств поверхностного слоя твердого тела на основе спектрального анализа. Нанотрибоспектрометрия / С.Г. Псахье, В.Л. Попов, Е.В. Шилько и др. // Физическая мезомеханика. – 2009. – 12(4). – С. 27-42.
123. Smolin, A.Yu. On the possibility of using acoustic spectra to study deformation processes in surface layers during friction / A.Yu. Smolin, S.A. Dobrynin, S.G. Psakhie // Technical Physics Letters. – 2009. – 35(12). – С. 1124-1128.
124. Williams, J.H. Acoustic-emission spectral analysis of fiber composite failure mechanisms / J.H. Williams, D.M. Egan // Mater. Eval. – 1979. – 37. – С. 43-47.
125. Barat V., Marchenkov A., Ivanov V., Bardakov V., Elizarov S., Machikhin A. Empirical approach to defect detection probability by acoustic emission testing // Applied Science. 2021. 11. 9429.

126. Davydova, D.G. Identification of Acoustic-Emission Sources during Testing of Technological Equipment with a High Noise Level / D.G. Davydova, A.N. Kuz'min, R.G. Rizvanov et al.// Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – 51(5). – С. 292-302.
127. Barat V., Borodin Y., Kuzmin A. Intelligent AE signal filtering methods // Journal of Acoustic Emission. 2010. V.28. P. 109–119.
128. Mishra, S. A Multivariate Cumulative Sum Method for Continuous Damage Monitoring with Lamb-wave Sensors /S. Mishra, O. Vanli, C. Park //International Journal of Prognostics and Health Management.–2015.–6.–С. 1-11
129. Bertrand, P. Off-line detection of multiple change points by the Filtered Derivative with p-Value method /P.Bertrand, M.Fhima, A.Guillin //Sequential Analysis.–2010.–26.–С.1-30.
130. He, L. Segmentation Method for Ship-Radiated Noise Using the Generalized Likelihood Ratio Test on an Ordinal Pattern Distribution / L. He, X.-H. Shen, M.-H. Zhang, H.-Y. Wang // Entropy. – 2020. – 22. – С. 374.
131. Li, F. Automatic event detection on noisy microseismograms / F. Li, J. Rich, K. J. Marfurt et al.// Proceedings Seg Technical Program Expanded Abstracts. – 2014. – С. 2363-2367.
132. Guirguis, A. A Robust and Sufficient Algorithm For Automatic First Arrival Picking Using Higherorder Statistics / A. Guirguis, A. El-Dahshan, A. Yahia // International Journal of Geology. – 2018. – 12. – С. 1-5.
133. Sedlak, P. Acoustic emission localization in thin multi-layer plates using first-arrival determination/P.Sedlak, Y.Hirose, M.Enoki//Mech.Syst.Signal Proc.–2013.–36.–С.636-649.
134. Basseville, M. Detection of Abrupt Changes: Theory and application / M. Basseville, I. V. Nikiforov, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, U.S.A., 1996. – 528 с .
135. Математические методы построения прогнозов / А. Грешилов, В. А. Стакун, А. А. Стакун – М.: Радио и связь, 1997. – 112 с.
136. Sharma, B.K. Evaluation of seismic events detection algorithms / B.K. Sharma, A. Kumar, V.M. Murthy //Journal of the Geological Society of India.– 2010.– 75.– С. 533-538.
137. Gaci, S. The Use of Wavelet-Based Denoising Techniques to Enhance the First-Arrival Picking on Seismic Traces / S. Gaci // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2014. – 52(8). – С. 4558-4563.
138. Jiao, L. Detection of seismic refraction signals using a variance fractal dimension technique/ L. Jiao, W.M. Moon//Geophysics.–2000.–65.–С.286-292.
139. Варшавский, П.Р. Разработка прецедентного модуля для идентификации сигналов при акустико-эмиссионном мониторинге сложных технических объектов / П.Р. Варшавский, Р.В. Алехин, А.В. Кожевников // Программные продукты и системы. – 2019. – 2(32). – С. 207-213.

140. Agletdinov, E. A New Method of Low Amplitude Signal Detection and Its Application in Acoustic Emission / E. Agletdinov, D. Merson, A. Vinogradov // *Applied Sciences*. – 2020. – 10 (1). – С. 73.
141. Küperkoch, L., Meier, T., Diehl, T. Automated event and phase identification / In book: Bormann, P. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*, Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2012. – Information Sheet, С. 1-52.
142. Van der Baan, M. Comparison of the STA/LTA and power spectral density methods for microseismic event detection / M. Van der Baan, Y. Vaezi // *Geophys. J. Int.* – 2015. – 203. – С. 1896-1908.
143. Ч. Чук, М. Бернфельд Радиолокационные сигналы. Пер. с англ. под ред. В.С. Кельзона / М.: Изд-во «Советское радио», 1971. – 568 с.
144. *Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction, Second Edition* / V.V. Saeed. – John Wiley & Sons Ltd, 2000. – 466 с.
145. Цифровая обработка сигналов/А.Б.Сергиенко–СПб.:Питер,2002.–608 с.
146. *Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction, Second Edition* / V.V. Saeed. – John Wiley & Sons Ltd, 2000. – 466 с.
147. Sondhi, M.M. Improving the Quality of Noisy Speech Signal / M.M. Sondhi, C.E. Schmidt, L.R. Rabiner // *Bell Syst.Tech Journ.*–1981.–60(8).–С.1847-1858.
148. Горбунов, А.И. Влияние амплитудно-частотной характеристики объекта контроля на измерение спектров акустической эмиссии / А.И. Горбунов, А.И. Лыков // *Дефектоскопия*. – 1988. – 12. – С. 32-41.
149. Муравьева, О.В. Методические особенности использования SH-волн и волн Лэмба при оценке анизотропии свойств листового проката / О.В. Муравьева, В.В. Муравьев // *Дефектоскопия*. – 2016. – 7. – С. 3-11.
150. Терентьев, Д.А. Идентификация сигналов акустической эмиссии при помощи частотно-временного анализа / Д.А. Терентьев // *В мире Неразрушающего контроля*. – 2013. – Т.60. – 2. – С. 51-55.
151. ASTM E976. A standard guide for determining the reproducibility of acoustic emission sensor response. – American Society for Testing and Materials, 2010.
152. *Mechanical Wear Fundamentals and Testing*. 2nd ed. / R.G. Bayer. – Marcel Dekker Ink, New York, USA, 2004. – 400 с.
153. Botvina, L.R. Wear Mechanisms of Structural Steels and Effect of Wear on Their Mechanical and Acoustic Properties during Tension / L.R. Botvina, V.P. Levin, M.R. Tyutin et al.//*Journal of Friction and Wear*.–2013.–34 (1).–С. 6-13.

154. Марченко, Е.А. Циклический характер накопления искажений II рода в поверхностном слое как физическое подтверждение усталостной природы износа / Е.А.Марченко, Е.Ф.Непомнящий, Г.М.Харач // ДАН СССР. – 1968. – 181(5). – С. 1103-1104.
155. Фадин, Ю.А. Периодичность акустической эмиссии при сухом трении пары сталь-латунь / Ю.А. Фадин, А.М. Лексовский, Б.М. Гинсбург и др. // Письма в ЖТФ. – 1993. – 5. – С. 10-13.
156. Жарин, А. Л. Некоторые особенности усталостного процесса при трении скольжения / А.Л. Жарин, Н.А. Шипица, Е.И. Фишвейн // Трение и износ. – 1993. – 14(4). – С. 645-656.
157. Техническая диагностика / И.А. Биргер – М: Машиностроение, 1978. – 240с.
158. Власов, И.Э. Полезность многократного контроля / И.Э. Власов, В.И. Иванов // Безопасность труда в промышленности. – 2005. – 12. – С. 50-93.
159. ГОСТ Р ИСО 13379. Контроль состояния и диагностика машин. Ч.1 и 2.
160. ANSI / NACE TM 0177. Laboratory Testing of Metals for Resistance to Specific Forms of Environmental Cracking H₂S Environments / Standard USA.
161. ASTM E647. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates / Standard USA.
162. Коэн, Л. Время - частотные распределения: Обзор / Л. Коэн // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (ТИИЭР). – 1989. – 77(10). – С. 72-120.
163. Лазоренко, О.В. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. 2. Методы анализа и применение / О.В. Лазоренко, Л.Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. – 2008. – Т. 13. – № 4. – С. 270–322.
164. Меркушева, А.В. Классы преобразований нестационарного сигнала в информационно-измерительных системах. II. Время-частотные преобразования / А.В. Меркушева // Научное приборостроение. – 2002. – Т. 12. – № 2. – С. 59–70.
165. Астафьева, Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения / Н.М. Астафьева // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166. – № 11. – С. 1145–1170.
166. Feng, Z. Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: A review with application examples / Z. Feng, M. Liang, F. Chu // Mech. Syst. Signal Process. – 2013. – № 38. – С. 165–205.
167. Yan, J. A Comparison of Time-Frequency Methods for Real-Time Application to High-Rate Dynamic Systems / J. Yan, S. Laflamme, P. Singh et al. // Vibration. – 2020. – № 3. – С. 204-216.

168. Novak, A. Synchronized Swept-Sine: Theory, Application, and Implementation / A. Novak, P. Lotton, L. Simon // *Journal of the Audio Engineering Society*. – 2015. – Том. 63. – №10. – С. 786–798.
169. Dhar, S.S. Tests For the Parameters of Chirp Signal Model / S.S. Dhar, D. Kundu, U. Das // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 2019. – Том. 67. – № 16. – С. 4291–4301.
170. Zhou, J. Acoustic emission signal denoising based on k-means clustering and wavelet analysis/J.Zhou,L.Liu,J.Yang//*Journal of Petrochemical Universities*.–2013.–26/3.–С.69-73.
171. Zhang, Z. Research on the AE Signal De-noising Based on k-Means Clustering and the Wavelet Transform / Z. Zhang, C. Wang // *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*. – 2015. – 10(7). – С.223-228.
172. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии: учеб. пособие / С.А. Бехер, А.Л. Бобров. — Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2013. - 145 с.
173. Fowler, T.J. The Monpac System / Fowler T.J., Blessing J.A., Conlisk P.J., Swanson T.L. // *Journal of Acoustic Emission*. – 1989. – 8. – С. 1-8.
174. Ключев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. / В.В. Ключев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалёв [и др.]; под ред. В.В. Ключева; изд. 3-е, испр. и доп – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
175. Patel, J. Fault diagnostics of rolling bearing based on improve time and frequency domain features using artificial neural networks / J. Patel, V. Patel, A. Patel // *International Journal for Scientific Research and Development*. – 2013. – 1(4). – С. 816-823.
176. Vinogradov, A. Acoustic Emission Spectrum and Its Orientation Dependence in Cooper Single Crystals / A. Vinogradov, M. Nadtochiy, S. Hashimoto, S. Miura // *Material Transactions*. – 1995. – 36(4). – С. 496-503.
177. Муравьева, О.В. Вероятностно-статистические параметры сигнала при контроле цилиндрических объектов зеркально-теневым методом многократных отражений /О.В. Муравьева, В.В. Муравьев, М.А. Габбасова// *Дефектоскопия*, 2015, № 12, С.11-18.
178. Caesarendra, W. A Review of Feature Extraction Methods in Vibration-Based Condition Monitoring and Its Application for Degradation Trend Estimation of Low-Speed Slew Bearing / W. Caesarendra, T. Tjahjowidodo // *Machines*. – 2017. – 5. – С. 21.
179. Vinogradov, A. In situ observations of the kinetics of twinning-detwinning and dislocation slip in magnesium / A. Vinogradov, E. Vasilev, M. Linderov, D. Merson // *Materials Science & Engineering A*. – 2016. – 676. – С. 351-360.
180. Digital Signal Processing for Acoustic Emission / P.R. Aguiar, C.H.R. Martins, M. Marchi, E.C. Bianchi. Chapter 12 in book: *Data Acquisition Applications*. Ed.: Z. Karakehayov – InTech - Rijeka Croatia, 2012. – 351 с.

181. Учебно-методическое пособие по математической статистике: для социальноэкономических специальностей / Е.А. Ивин, А.Н. Курбацкий, Д. В. Артамонов. – Вологда: ИСЭРТ РАН, 2017. – 141 с.
182. Холькин, О.В. О локационной информативности сигналов акустической эмиссии / О.В. Холькин // Дефектоскопия. – 1982. – С.32-40.
183. Shehadeh, M. Acoustic emission source location for steel pipe and pipeline applications: the role of arrival time estimation / M. Shehadeh, J.A. Steel, R.L. Reuben / JPME52 IMechE. – 2006. – Т. 220. – Часть E: J. Process Mechanical Engineering. – С. 121-133.
184. Асадов, Х.Г. Частотно-триангуляционный метод локации источников звука / Х.Г. Асадов, Н.А. Абдуллаев, Р.Н. Абдулов, В.М. Гараев // Контроль, Диагностика. – 2011. – №5. – С.48-51.
185. Попков, А.А. Использование фазовой локации для определения направления источника акустической эмиссии / А.А. Попков // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. – 2016. – 3. – С. 14-20.
186. Наконечная, О.А. Методы и алгоритмы локации источников акустической эмиссии / Электромашиностроение и электрооборудование. – 2009. – 72. – С.111-115.
187. Лапшин, Б.М. Взаимно-спектральный метод обнаружения утечки на трубопроводах с односторонним доступом / Б.М. Лапшин, А.Л. Овчинников // Дефектоскопия. – 2004. – №9. – С. 19-26.
188. Бериков, В.Б. Современные тенденции в кластерном анализе / В.Б. Бериков, Г.С. Лбов // Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные системы». – 2008. – 26 с.
189. Гуменюк, В.А. Система классификации степени опасности источников акустической эмиссии и критерии экспресс-оценки состояния объектов на основе нечеткой логики / Гуменюк В.А., Сульженко В.А., Казаков В.А., Яковлев А.В. // Контроль. Диагностика. – 2003. – 1. – С. 49-53.
190. Ledecz, A. Wireless Acoustic Emission Sensor Network for Structural Monitoring / Ledecz A., Hay T., Volgyesi P., Hay D. R., Nadas A., Jayaraman S. // IEEE Sensors Journal. – 2009. – 9(11). – С. 1370-1377.
191. Colombo, S. AE energy analysis on concrete bridge beams / Colombo S., Forde M., Main I., Halliday J., Shigeishi M. // Materials and Structures. – 2005. – 38. – С. 851-856.
192. Дорохова, Е.Г. Применение информационного статистического АЭ-критерия / Е.Г. Дорохова, М.Ю.Ростовцев//В мире Неразрушающего контроля.–2007.–2(36).–С.49-52.

193. Муравьев, В.В. Оценка степени опасности дефектов при АЭ-контроле металлических конструкций / В.В. Муравьев, Л.Н. Степанова, Е.Ю. Лебедев, А.Е. Каеев // Дефектоскопия. – 2002. – 8. – С. 44-52.
194. Патент № RU 2051368. Способ оценки состояния пар трения / О.В. Холодилов, Е.И. Островский, Т.М. Калмыкова / Заявка № 4848726/28 от 09.07.1990 г. Опубл. 27.12.1995.
195. Boness, R.J. Wear studies using acoustic emission techniques / R.J. Boness, S.L. McBride, M. Sobczyk // Tribology International.–1990.–23(5).–С.291-295.
196. Rippengill, S. Automatic classification of acoustic emission patterns / S. Rippengill, K. Worden, K.M. Holford, R. Pullin // Strain.–2003.–39.–С.31-41.
197. Pomponi, E. A real-time approach to acoustic emission clustering / E. Pomponi, A. Vinogradov // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2013. – 40(2). – С. 791-804.
198. Sadegh, H. Classification of acoustic emission signals generated from journal bearing at different lubrication conditions based on wavelet analysis in combination with artificial neural network and genetic algorithm / H. Sadegh, A.N. Mehdi, A. Mehdi // Tribol. Int. – 2016. – 95. – С. 426-434.
199. Мерсон, Д.Л. Применение методики анализа спектральных образов сигналов акустической эмиссии для исследования повреждаемости покрытий TiN на стальной подложке / Д.Л. Мерсон, А.А. Разуваев, А.Ю. Виноградов // Дефектоскопия. – 2002. – 7. – С. 37-46.
200. Vinogradov, A. Stochastic dislocation kinetics and fractal structures in deforming metals probed by acoustic emission and surface topography measurements / A. Vinogradov, I. Yasnikov, Y. Estrin // Journal of Applied Physics. – 2014. – 115(23). – 233506.
201. Vinogradov, A. Acoustic emission during cyclic deformation of ultrafine-grain copper processed by severe plastic deformation / A. Vinogradov, V. Patlan, S. Hashimoto et al. // Philosophical Magazine A. – 2002. – 82(2). – С. 317-335.
202. Серьезнова, А.Н. Экспериментальное установление связи спектра сигнала АЭ с длиной усталостной трещины в стальных образцах / А.Н. Серьезнова, В.В. Муравьев, Л.Н. Степанова и др. // Дефектоскопия, 1999, №2, с. 73-78.
203. Мерсон, Д.Л. Применение спектрального анализа сигналов акустической эмиссии для оценки состояния стали 20 / Е.В. Черняева, Д.Л. Мерсон, Д.Е. Мещеряков // Деформация и разрушение материалов. – 2009. – 1. – С. 44-48.
204. Черняева, Е.В. Влияние барокриодеформирования на содержание водорода и акустическую эмиссию в техническом титане ВТ1-0 / Е.В. Черняева, П.А. Хаймович, А.М. Полянский и др. // Журнал технической физики. – 2011. – 81(4). – С. 131-134.

205. Мерсон, Д.Л. Изучение процессов разрушения поверхностей, деформируемых трением, методом акустической эмиссии / Д.Л. Мерсон, В.И. Полуниин, Б.А. Чудинов и др. // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – 8. – С.9-13.
206. Рубцов, В.Е. Использование акустической эмиссии для анализа процессов изнашивания при трении скольжения / В.Е. Рубцов, Е.А. Колубаев, А.В. Колубаев и др. // Письма в ЖТФ. – 2013. – 39(4). – С. 79-86.
207. Елизаров, С.В. Проверка герметичности запорной арматуры при помощи портативного многофункционального прибора "UNISCOPE" / С.В. Елизаров, В.А. Барат, Д.А. Щелаков // В мире неразрушающего контроля. – 2012. – 1 (55). – С. 22-24.
208. Сивов, И.Е. Оценка степени герметичности шаровых кранов DN800, установленных на компрессорной станции «Портовая» / И.Е. Сивов, А.В. Сорокин, А.А. Сухолитко и др. // В мире неразрушающего контроля. – 2015. – 18(3). – С. 34-37.
209. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 168 с.
210. ГОСТ 9490-75. Материалы смазочные жидкие и пластичные. Метод определения трибологических характеристик на четырехшариковой машине (аналог ASTM D2596 и ASTM D2783).
211. Основы проектирования. Учебное пособие/ Н.Игнатъев.–АзовПечать,2011.– 511с.
212. Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications / L.P. Valentin. – Springer-Verlag GmbH Germany, 2017. – 391 с.
213. ASTM G99. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus / ASTM International, West Conshohocken, PA.
214. ASTM G77. Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test, Wear Test / ASTM International, West Conshohocken, PA.
215. МУК-СЦКДМ-001-2019. Методика ультразвукового контроля цапф сушильных цилиндров картоноделательных машин / Тольятти: ООО «ЛАЭС», 2020. – 35 с.
216. РУА-93. Руководящие указания по эксплуатации и ремонту сосудов и аппаратов, работающих под давлением ниже 0,07 МПа (0,7 кгс/см²) и вакуумом – Минтопэнерго РФ, ВНИИКТИнефтехимоборудование, Волгоград, 1994.
217. Lazarev, S. Electromagnetic method of elastic wave excitation for calibration of acoustic emission sensors and apparatus / S. Lazarev, A. Mozgovoï, A. Vinogradov et al. // Journal of Acoustic Emission. –2009. – 27. – С. 212-223.
218. Vinogradov, A. Effect of solid solution hardening and stacking fault energy on plastic flow and acoustic emission in Cu-Ge alloys / A. Vinogradov, D.L. Merson, V. Patlan, S. Hashimoto // Materials Science and Engineering: A. – 2003. – 341(1-2). – С. 57-73.

219. Муравьев, В.В. Анализ погрешности определения координат источников акустической эмиссии в конструкциях из листовой стали / В.В. Муравьев, С.А. Бехер, К.В. Власов // Дефектоскопия. – 2008. – 7. – С. 53-59.
220. Серьезнов, А.Н. Расчетно-экспериментальный АЭ-метод определения координат дефектов в металлических конструкциях / А.Н. Серьезнов, В.В. Муравьев, Л.Н. Степанова и др. // Дефектоскопия. – 2000. – 6. – С. 71-79.
221. Серьезнов, А.Н. Локализация сигналов акустической эмиссии в металлических конструкциях / А.Н. Серьезнов, В.В. Муравьев, Л.Н. Степанова и др. // Дефектоскопия. – 1997. – 10. – С. 79-84.
222. Гомера, В.П. К вопросу о раннем диагностировании расслоений в стенках сосудов давления ультразвуковым и акустико-эмиссионным методами / В.П. Гомера, И.А. Растегаев // Контроль. Диагностика. – 2015. – 1. – С. 82-89.
223. Rastegaev, I.A. The Specific Features of Acoustic-Emission Testing of Vessel Equipment with a Wall Delamination of a Technological Origin / I.A. Rastegaev, A.V. Chugunov, A.Yu. Vinogradov et al.//Russian Journal of Nondestructive Testing.–2015.–51(5).– С.280–291.
224. Чугунов, А.В. Опыт применения метода акустической эмиссии при контроле реактора гидроочистки дизельного топлива / А.В. Чугунов, И.А. Растегаев, А.А. Растегаев, П.Н. Зорин // Контроль. Диагностика. – 2015. – 11. – С. 9-17.
225. Дворников, С.В. Теоретические основы синтеза билинейных распределений энергии нестационарных процессов в частотно-временном пространстве (обзор) // Труды учебных заведений связи. – 2018. – 4(1). – С. 47-60 и 2018. – 4(2). – С. 69-81.
226. Hilbert–Huang Transform and Its Applications / Ed. N.E. Huang, S.S.P. Shen // Interdisciplinary Mathematical Sciences. World Scientific Publishing Co, Singapore, 2014. – Том 5. – 311 с.
227. Liu, Y. Hilbert-Huang Transform and the Application / Y. Liu, H. An, S. Bian / IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS). – 2020. – 20-22. – С. 534-539.
228. Овчарук, В.Н. Спектральный анализ сигналов акустической эмиссии / В.Н. Овчарук // Ученые заметки Тихоокеанского государственного университета: электронное научное издание. – 2013. – 4(4). – С. 974-986.
229. Харрис, Ф.Дж. Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье / Ф.Дж. Харрис // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (ТИИЭР). –1978. – Т.6. – №1. – С. 60-96.
230. Nuttall, A.H. Some Windows with Very Good Sidelobe Behavior / A.H. Nuttall // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1981. – С. 84-91.

231. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения / А.А. Короновский, А.Е. Храмов – М. : Физматлит, 2003. – 176 с.
232. Всплески и другие методы локализации в фазовом пространстве / И. Добеши – М: Мир, 1999. – С. 84-108.
233. Основы вейвлет-анализа сигналов / Л.В. Новиков – СПб, ИАиП РАН, 1999. – 152 с.
234. The Wigner Distribution: Theory and Applications in Signal Processing / W. Mecklenbräuker, F. Hlawatsch – Elsevier Science, 1997. – 480 с.
235. Choi, H.I. Improved time-frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels / H.I. Choi, W. Williams // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1989. – № 37. – С. 862-872.
236. Пономарев, В.А. Инверсия дискретного времени и параметрическое дискретное преобразование Фурье / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева // Интеллектуальные системы в производстве.– 2016.– 4.– С. 31.
237. Останин, С.А. Увеличение отношения сигнал/шум методом вычисления автокорреляционной функции / С.А. Останин // Журнал радиоэлектроники. – 2011. – 12. – С. 1-9.
238. Vinogradov, A. Principles of statistical and spectral analysis of acoustic emission and their application to plastic deformation of metallic glasses / A. Vinogradov // Journal of Acoustic Emission. – 1998. – 16. – С. 158-169.
239. Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико-эмиссионным методом / Дробот Ю.Б., Лазарев А.М.–М.: Изд-во стандартов, 1987.– 128 с.
240. Дробот, Ю.Б. Некоторые особенности сигналов акустической эмиссии от трения берегов трещин / Ю.Б. Дробот, А.М. Лазарев // Дефектоскопия. –1981. – 9. – С. 6-10.
241. Heat dissipation and acoustic emission features of titanium alloys in cyclic deformation mode / Iziumova A.Y., Vshivkov A.N., Prokhorov A.E. et al.// Acta Mechanica. 2021, 232(5). 1853-1861.
242. Dunegan, H.L. Detection of Fatigue Crack Growth by Acoustic / H.L. Dunegan, D.O. Harris, A.S. Tetelman // Emission Techniques. Materials Evaluation. –1970.–28.–С.221-227.
243. Bassim, M.N. Acoustic emission during the low cycle fatigue of AISI 4340 steel / M.N. Bassim, M. Houssny-Emam // Materials Science and Engineering. – 1984. – 68. – С. 79-83.
244. ГОСТ 30480-97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования / М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998.
245. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
246. Трение и износ. / И.В. Крагельский. – М.: МАШГИЗ, 1962. – 384 с.

247. Основы расчётов на трение и износ. / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов – М.: Машиностроение, 1977. – 576 с.
248. Основы трения и изнашивания / Г. Польцер, Ф. Майсснер. – М: Машиностроение, 1984. – 264 с.
249. Пульсационные аппараты роторного типа. Теория и практика / М.А. Промтов: Монография. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 260 с.
250. Методы расчета характеристик роторного импульсного аппарата: монография / М.А. Промтов, А.Ю. Степанов, А.В. Алешин. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 148 с.
251. Растегаева, И.И. Безреагентные методы обеззараживания смазочно-охлаждающих жидкостей / И.И. Растегаева, В.В. Диженин, А.А. Викарчук // Вектор науки ТГУ. – 2010. – 2(12). – С. 15-19.
252. Ханухов, Х.М. Особенности соблюдения требований промышленной безопасности при проектировании изотермических резервуаров / Х.М. Ханухов, А.В. Алипов, С.В. Зимина и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – 12. – С. 57-64.
253. Пьезоэлектрические преобразователи / Шарапов В.М., Минаев И.Г., Бондаренко Ю.Ю. и др. – Черкассы, ЧГТУ, 2004. – 435 с.
254. Акустические измерения в ядерной энергетике / В.М. Баранов. –М.: Энергоатомиздат, 1990. – 319 с.
255. Расчет и проектирование экспериментальных установок / Б.З. Персов. –Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Институт компьютерных исследований, 2006. – 348 с.
256. Воронцов, В.Б. Акустико-эмиссионная установка «Ангара-2» для определения содержания водорода в расплавах алюминиевых литейных сплавов / В.Б. Воронцов, А.В. Горчинский, А.Н. Янченко и др. // Дефектоскопия. – 2007. – 1. – С. 50-55.
257. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств / С.М. Боровиков, И.Н. Цырельчук, Ф.Д. Троян. – Минск: БГУИР, 2010. – 68 с.
258. Надежность технических систем и техногенный риск / В.А. Акимов, В.Л. Лапин, В.М. Попов и др. – М.: ЗАО ФИД«Деловой экспресс», 2002. – 368 с.
259. Основы надежности электронных средств / Н.П. Ямпурин, А.В. Баранова. – М.: Изд. центр «Академия», 2010. – 240 с.
260. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль/И.Н.Ермолов,Ю.В.Ланге.–М:Машиностроение,2004.–864 с.
261. Zelenyak, A.M. Modeling of Acoustic Emission Signal Propagation in Waveguides / A.M. Zelenyak, M.A. Hamstad, M.G.R. Sause // Sensors. – 2015. – 15. – С. 11805-11822.

Список основных публикаций автора по теме диссертационного исследования

Учебные пособия и главы в монографиях

- A1. 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.

Статьи в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК и международные базы цитирования Web of Science и Scopus

- A2. Растегаев, И.А. Основы эффективной организации акустико-эмиссионного контроля / И.А. Растегаев, Д.Л. Мерсон, А.К. Хрусталева, А.А. Растегаев, П.Н. Зорин, А.А. Торопов, А.В. Чугунов // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 12. – С. 41 – 49.
- A3. 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.
- A4. 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.
- A5. 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.
- A6. 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, A. D. Smirnov, A. V. Grigor'eva // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – 54(9). – С. 619-629.
- A7. 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.
- A8. 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.

- A9. 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.
- A10. 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.
- A11. 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.
- A12. 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.
- A13. Растегаев, И.А. Анализ шумоподобных сигналов акустической эмиссии способами широкополосной фильтрации / И.А. Растегаев, А.В. Данюк, А.Ю. Виноградов, Д.Л. Мерсон, И.И. Растегаева // *Контроль. Диагностика*. – 2014. – № 8. – С. 49-56.
- A14. 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, D.L. Merson, A.V. Chugunov // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2013. – Том 49, № 10. – С. 553–561.
- A15. 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.
- A16. 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.
- A17. 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).

- A18. 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.
- A19. 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
- A20. 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. Мерсон, А.Ю. Виноградов // *Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика*. – 2012. – №5. – С. 25-31.
- A21. Danyuk, A.V. Advanced-Reliability Acoustic-Emission Transducers / A.V. Danyuk, I.A. Rastegaev, D.L. Merson, A. Vinogradov // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2017. – Том 53. – № 1. – С. 32–38.
- A22. Rastegaev, I.A. Universal Waveguide for the Acoustic-Emission Evaluation of High-Temperature Industrial Objects / I.A. Rastegaev, D.L. Merson, A.V. Danyuk, M.A. Afanas'yev, A.K. Khrustalev // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2018. – Том 54. – № 3. – С. 164-173.

Статьи в изданиях, не входящих в перечень ВАК и международные базы цитирования Web of Science и Scopus

- A23. Rastegaev, I. Enhancement of efficiency of tribological testing by using acoustic emission measurements / I.Rastegaev, D.Merson, A.Vinogradov // *Journal of Acoustic Emission*. – 2017. – №32. – С. s91-s97.

Патенты на изобретения (Приложение Е)

- A24. Патент РФ № RU 2515423. Способ повышения точности локации шумоподобных источников акустической эмиссии на основе спектрально-временного самоподобия / Опубликовано 10.05.2014 Бюл. № 13.
- A25. Патент РФ № RU 2601270. Преобразователь акустической эмиссии повышенной надежности / Опубликовано 27.10.2016 Бюл. № 30.
- A26 Патент РФ № RU 2608969. Универсальный учебно-исследовательский стенд изучения генерации и распространения акустических волн в элементах промышленных объектов от имитаторов реальных источников акустической эмиссии / Опубликовано 30.01.2017 Бюл. № 4.
- A27. Патент РФ № RU 2665360. Универсальный волновод сигналов акустической эмиссии / Опубликовано 29.08.2018 Бюл. № 25.

- A28. Патент РФ № RU 2684709. Способ акустико-эмиссионной диагностики динамического промышленного оборудования / Опубликовано 11.04.2019 Бюл. № 11. *Сборники докладов семинаров, симпозиумов и конференций*
- A29. Викарчук, А.А. Использование метода акустической эмиссии для оптимизации режимов обработки конденсированных сред / А.А. Викарчук, И.И. Растегаева, И.А. Растегаев, В.В. Диженин // Тезисы докладов V Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» ПРОСТ-2010 – Москва: МИСиС, 2010. – С. 199.
- A30. Викарчук, А.А. Методы оптимизации кавитационной обработки гетерофазных жидкостей / А.А. Викарчук, И.И. Растегаева, В.В. Диженин, И.А. Растегаев // VI Международная научная конференция «Прочность и разрушение материалов и конструкций»: материалы конференции. Науч. ред. С.Н. Летута, Г.В. Клевцов. – Оренбург: ОГУ, 2010. – С. 91-98.
- A31. Викарчук, А.А. Применение акустических методов контроля для оптимизации технологических режимов кавитационной обработки гетерофазных жидкостей / А.А. Викарчук, И.И. Растегаева, И.А. Растегаев, М.Н. Селезнёв // 50 Международный научный симпозиум «Актуальные проблемы прочности»: материалы конференции Ч.1 – Витебск, Беларусь: УО «ВГТУ», 2010. – С. 88-89.
- A32. Растегаева, И.И. Методика кавитационного обеззараживания смазочно-охлаждающих жидкостей / И.И. Растегаева, В.В. Диженин, И.А. Растегаев, М.Н. Селезнёв, А.А. Викарчук // Приоритетные направления развития науки и технологий: доклады IX Всероссийской научно-техн. конф.; под общ. ред. Э.М. Соколова – Тула: Изд-во «Инновационные технологии», 2011. – С. 61-66.
- A33. Растегаев, И.А. Восстановление хронологии разрушения материала на шариковых машинах трения по параметрам сигналов акустической эмиссии / И.А. Растегаев, Д.Л. Мерсон // «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений»: VI Всероссийская молодёжная научная конференция; «Физическое материаловедение»: V Международная школа: сб. конкурсных докладов – Тольятти: ТГУ, 2011. – С. 140-145.
- A34. Селезнёв, М.Н. Применение акустических методов для исследования кавитации / М.Н. Селезнёв, И.А. Растегаев, А.А. Викарчук // «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений»: VI Всероссийская молодёжная научная конференция; «Физическое материаловедение»: V Международная школа: сб. конкурсных докладов – Тольятти: ТГУ, 2011. – С. 160-164.

- A35. Растегаева, И.И. Метод оптимизации кавитационной обработки жидкостей / И.И. Растегаева, А.А. Викарчук, И.А. Растегаев // «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений»: VI Всероссийская молодёжная научная конференция; «Физическое материаловедение»: V Международная школа: сборник материалов – Тольятти: ТГУ, 2011. – С. 40-41.
- A36. Селезнев, М.Н. Методика обработки акустических сигналов при анализе непрерывных шумоподобных процессов / М.Н. Селезнев, И.А. Растегаев, Д.Л. Мерсон // Сборник тезисов докладов IX Всероссийской школы-конференции молодых ученых «КоМУ-2011» – Ижевск: ФТИ УрО РАН, 2011 – С. 92-95.
- A37. Растегаев, И.А. Применение критерия подобия для анализа сигналов акустической эмиссии при испытании ёмкостного оборудования на герметичность / И.А. Растегаев, Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов // Сборник трудов VI-й Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» ПРОСТ-2012 – Москва: НИТУ «МИСиС», 2012. – С. 166.
- A38. Растегаев, И.А. О проблеме идентификации доминирующих механизмов изнашивания трибосопряжений по сигналам акустической эмиссии / И.А. Растегаев, Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов // Сборник трудов XII международной конференции «Трибология и надёжность» – Санкт-Петербург: БГТУ им. Д.Ф.Устинова («ВОЕНМЕХ»), 2012 – С. 98-111.
- A39. Растегаев, И.А. Акустико-эмиссионные критерии оценки перехода циклически нагруженного материала в критическое состояние / И.А. Растегаев, А.В. Данюк, М.А. Афанасьев, Д.Л. Мерсон // Динамика и виброакустика машин: материалы III международной научно-технической конференции – Самара: Самарский университет, 2016. – С. 19 - 20.
- A40. Данюк, А.В. Повышение информативности метода акустической эмиссии при мониторинге усталостного разрушения материалов / А.В. Данюк, И.А. Растегаев, М.Л. Линдеров, Д.Л. Мерсон // Динамика и виброакустика машин: материалы III международной научно-технической конференции – Самара: Самарский университет, 2016. – С. 21 – 22.
- A42. Растегаев И.А. Применение метода акустической эмиссии для повышения вероятности диагностирования расслоения стенки емкостного оборудования / И.А. Растегаев, В.П. Гомера, С.А. Тюпин, А.Д. Смирнов, А.В. Григорьева // Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (АПМАЭ-2018): Всероссийская конференция с международным участием (Тольятти, 28 мая – 1 июня 2018 года):

- сборник материалов / отв. ред. Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2018. - с. 53-54
- А43. Растегаев, И.А. Подходы к анализу шумоподобной акустической эмиссии при беспороговом режиме ее регистрации / И.А. Растегаев, Д.Л. Мерсон, И.И. Растегаева // Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (АПМАЭ-2018): Всероссийская конференция с международным участием: сборник материалов. Отв. ред. Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2018. – С. 103-104.
- А44. Растегаев, И.А. Применение метода акустической эмиссии для поиска и исследования переходных режимов трения и изнашивания / Растегаев И.А., Мерсон Д.Л., Виноградов А.Ю., Данюк А.В., Растегаева И.И. // Сборник трудов XII Международной научно-технической конференции «Трибология – машиностроению» (ТриБОМАШ-2018) – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018. – С. 425-429.
- А45. Гомера В.П. Особенности диагностики расслоения металла в сосудах давления с использованием акустико-эмиссионного и ультразвуковых методов неразрушающего контроля / В.П. Гомера, И.А. Растегаев, Е.Ю. Нефедьев, А.В. Григорьева // Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 8-й Международной научно-практической конференции (ММЕСЕ-2019) – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. - с.405-423.
- А46. Растегаева, И.И. Возможности кластерного анализа сигналов акустической эмиссии для оценки износа пар трения скольжения / И.И. Растегаева, И.А. Растегаев, Д.Л. Мерсон // Всероссийская конференция с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (АПМАЭ-2021): сборник материалов – Санкт-Петербург: Свен, 2021. – С. 29-30.
- А47. Растегаев И.А. Акустико-эмиссионная диагностика цапф сушильных цилиндров бумаго- и картоноделательных машин / И.А. Растегаев, А.К. Хрусталева, Д.В. Севастьянов и др. // Всероссийская конференция с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (АПМАЭ-2021): сборник материалов – Санкт-Петербург: Свен, 2021. – С. 99-100.
- А48. Способ измерения износа в узлах трения скольжения с применением кластерного анализа сопутствующей акустической эмиссии / Растегаева И.И., Растегаев И.А., Мерсон Д.Л. // Физическое материаловедение: X Международная школа, посвященная 10-летию лаборатории «Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы» – Тольятти: ТГУ, 2021. – С. 194-195.

A49. Разработка подхода оценки поврежденности несущих элементов динамического оборудования по акустико-эмиссионным признакам / Растегаев И.А., Хрусталеv А.К., Данюк А.В. и др.// Физическое материаловедение: X Международная школа, посвященная 10-летию лаборатории «Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы» – Тольятти: ТГУ, 2021. – С. 198-199.

Методика (Приложение Д)

A50. МАЭК-СЦКДМ-001-2019. Экспресс-методика оценки акустико-эмиссионной активности цапф сушильных цилиндров картоноделательных машин / Тольятти: ООО «ЛАЭС», 2020. – 76 с.

**Поясняющие рисунки к описанию результатов экспериментального сравнения
частотно-временных преобразований**

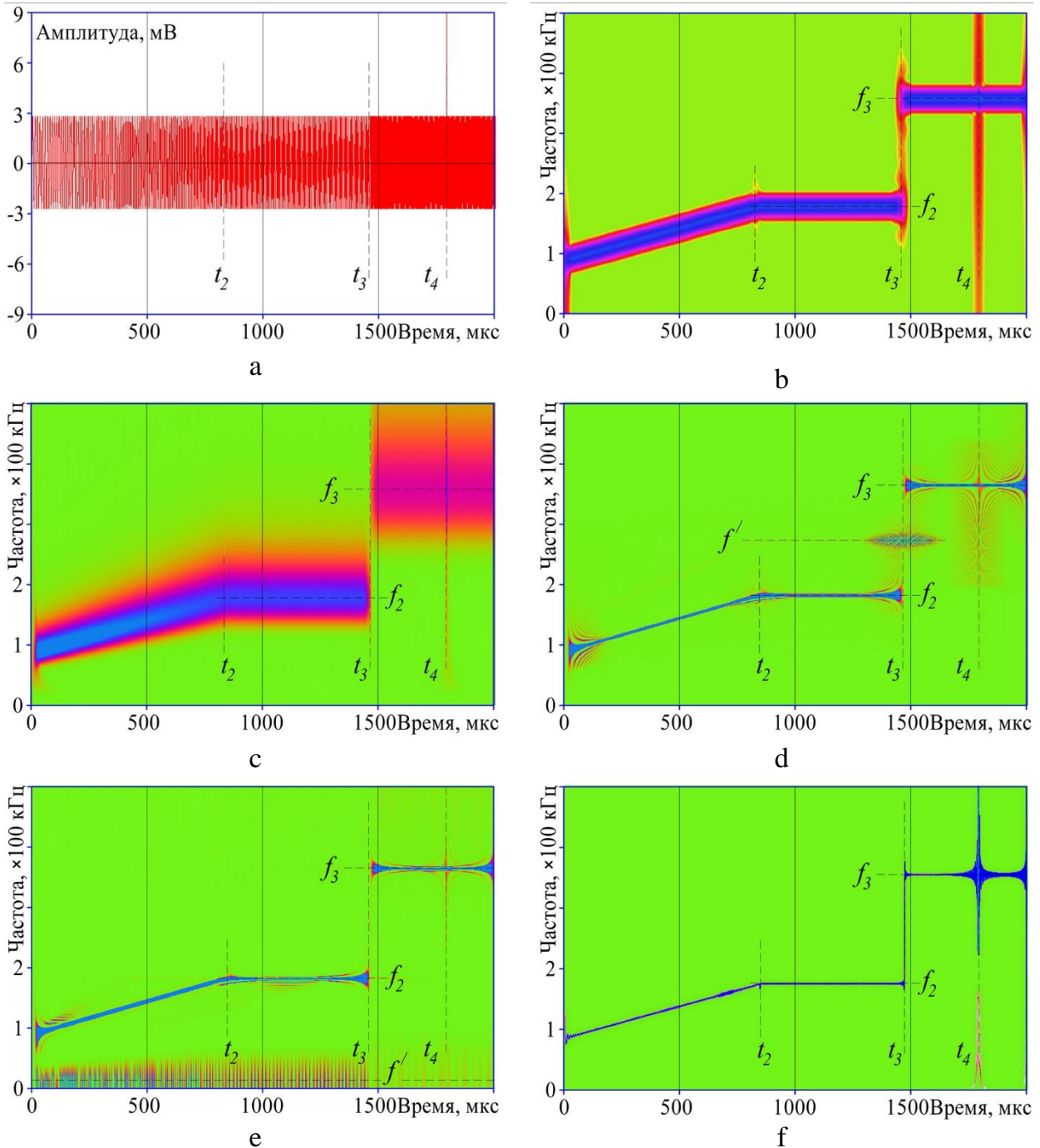
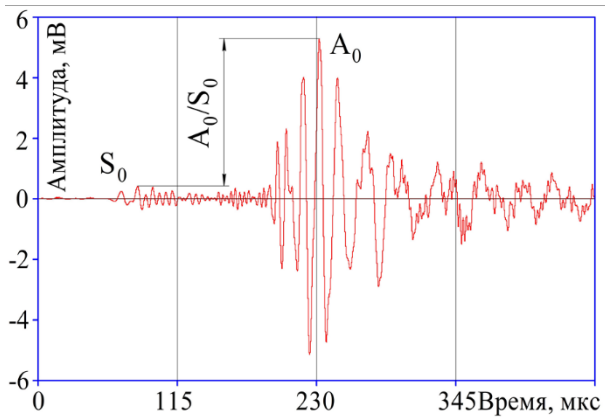
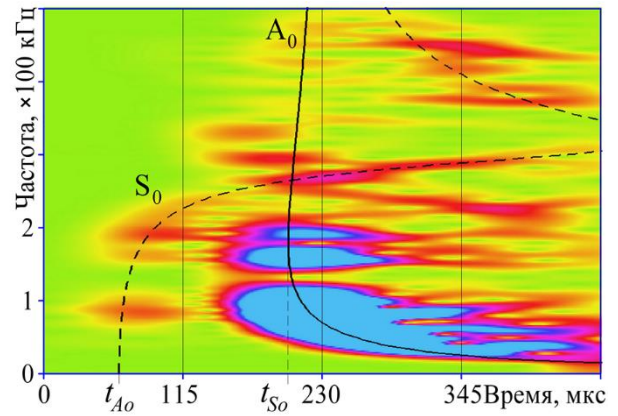


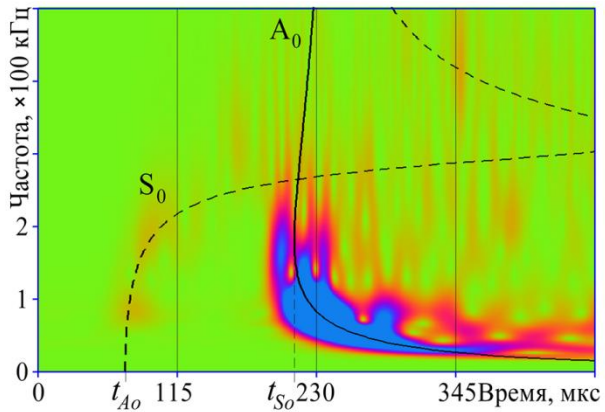
Рисунок А1 – Общий вид модельного сигнала 1 типа (а) и его частотно-временное представление, полученное с помощью преобразования: STFT (b), WT (c), SPWD (d), ChWD (e) и HHT (f).



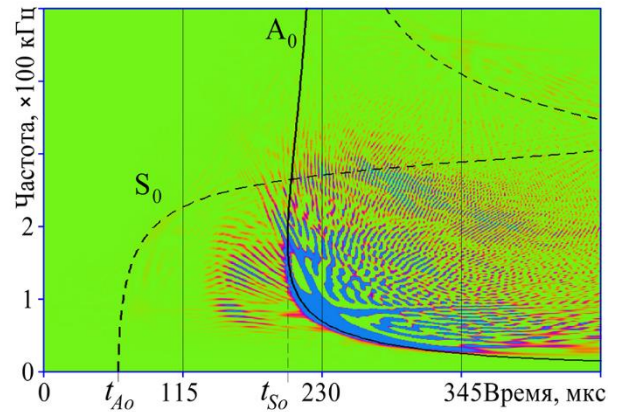
а



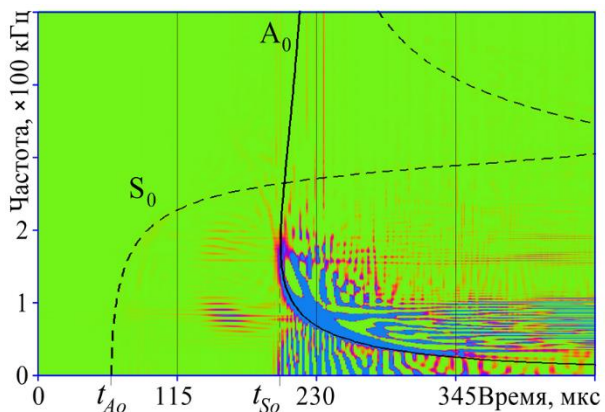
b



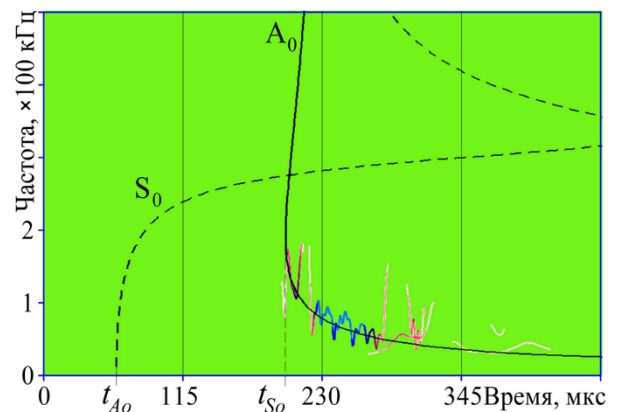
с



d



е



f

Рисунок А2 – Общий вид модельного сигнала 2 типа (а) и его частотно-временное представление, полученное с помощью преобразования: STFT (b), WT (c), SPWD (d), ChWD (e), ННТ (f).

На рисунке линиями обозначены: — - мода A_0 , - - - - мода S_0 .

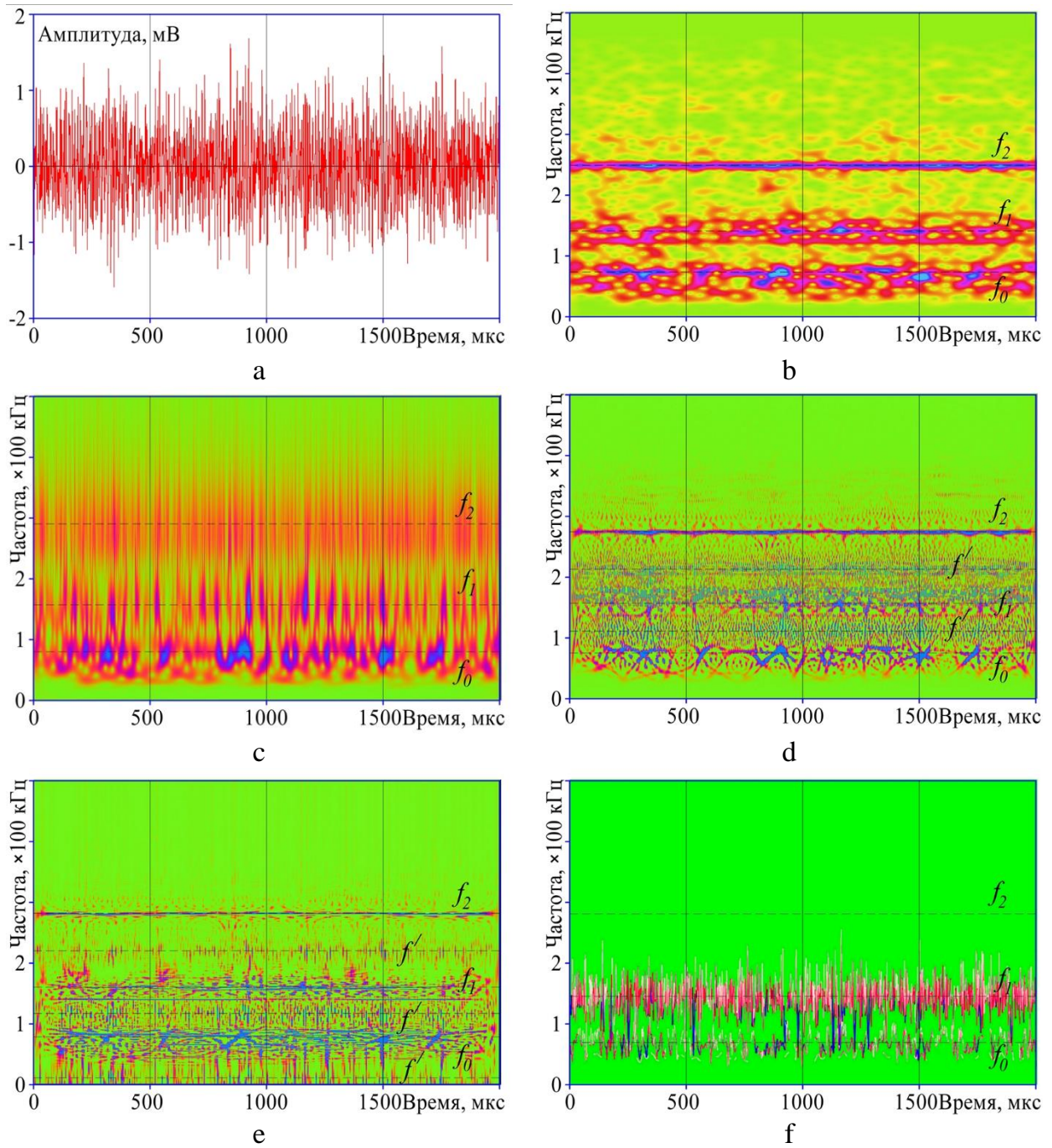


Рисунок А3 – Общий вид модельного сигнала 3 типа (а) и его частотно-временное представление, полученное с помощью преобразования: STFT (b), WT (c), SPWD (d), ChWD (e) и ННТ (f).

Результаты исследования характеристик преобразователя акустической эмиссии повышенной надежности

Устройство и описание конструктивного исполнения преобразователя акустической эмиссии повышенной надежности (ПАЭПН), разработанного в рамках настоящей работы, приведено в п. 7.2 Главы 7. Поэтому здесь только отметим, что ключевой отличительной особенностью ПАЭПН является наличие возможности переключения режимов его работы, которые и определяют его живучесть и надежность. При этом возможны следующие три основных режима работы ПАЭПН: I – суммирование сигнала в общей точке по всем дублирующим линиям ПАЭПН; II – суммирование сигнала в общей точке по нескольким дублирующим линиям и III – отдельный вывод сигнала по каждой дублирующей линии.

Основным преимуществом I режима подключения является повышение живучести ПАЭПН за счет дублирования линий (каналов) регистрации АЭ по сравнению с одноканальной стандартной схемой ПАЭ. Известно, что в этом случае вероятность отказа ПАЭПН (P) в течение времени (t) переходит от закона (Б.1) [257] к закону (Б.2) [258]:

$$P_0(t) = e^{-\Lambda \cdot t}, \quad (\text{Б.1})$$

$$P_1(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\Lambda_i \cdot t}), \quad (\text{Б.2})$$

Здесь: Λ_i - эксплуатационная интенсивность отказа i -го элемента; n - количество параллельно соединенных дублирующих линий.

При II режиме подключения сохраняются все преимущества режима подключения I и добавляется возможность провести локацию источника АЭ одним ПАЭПН [A21, A25]. При этом вероятность отказа ПАЭПН меняется на закон (Б.3) [258]:

$$P_{II}(t) = \sum_{i=k}^n \frac{n!}{(n-i)! \cdot i!} \cdot (e^{-\Lambda_i \cdot t})^i \cdot (1 - e^{-\Lambda_i \cdot t})^{n-i}, \quad (\text{Б.3})$$

В формуле (Б.3): Λ_i - эксплуатационная интенсивность отказа i -го набора резервирующих линий ПАЭПН; n - общее количество параллельно соединенных резервирующих линий ПАЭПН; k - минимальное количество исправных резервирующих линий, необходимых для работы ПАЭПН.

При III режиме подключения обеспечиваются преимущества режимов I и II (путем программного суммирования сигналов при обработке АЭ-данных), а также возможен ненагруженный резерв дублирующих линий. Кроме этого, возможно определение координат источников АЭ одним ПАЭПН с минимальным количеством работающих

линий (начиная с двух при линейной локации и с трех — при плоскостной). В III режиме эксплуатации ПАЭПН вероятность его отказа определяется законом (Б.4) [258]:

$$P_{III}(t) = (e^{-\Lambda t}) \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\Lambda t)^i}{i!}, \quad (\text{Б.4})$$

Здесь: Λ - эксплуатационная интенсивность отказа линии ПАЭПН; n - общее количество дублирующих линий ПАЭПН; i - порядковый номер замещающей линии ПАЭПН, $i = 0 \dots n$.

Эксплуатационная интенсивность отказа дублирующей линии (Λ) определяется по известной статистике отказов входящих в его конструкцию элементов по следующей формуле [258, 259]:

$$\Lambda = \sum_1^q \lambda_{eq} \cdot N_q, \quad (\text{Б.5})$$

Здесь: q - количество типов расчетных элементов в дублирующей линии ПАЭПН; N_q - количество q -го элемента в одной линии ПАЭПН; λ_{eq} - эксплуатационная интенсивность отказа q -го элемента ПАЭПН. Поскольку в ПАЭПН применялись только типовые элементы массового производства с простым конструктивным исполнением, то λ_{eq} определяется из обобщенной математической модели прогнозирования эксплуатационной безотказности [257, 259]:

$$\lambda_e = \lambda_0 \cdot \prod_{j=1}^m K_j, \quad (\text{Б.6})$$

Здесь: λ_0 - базовая интенсивность отказа элемента ПАЭПН с учетом внезапной и постепенной потери работоспособности (справочная величина); K_j - коэффициент, учитывающий влияние различных факторов на безотказность элемента ПАЭПН; m - количество факторов, принятых во внимание из числа влияющих на безотказность элементов.

Результаты теоретической оценки повышения надежности ПАЭПН выполненные по формулам (Б.1) – (Б.6), при нескольких вариантах его конструктивного исполнения и режима работы, сведены в таблице 7.1 Главы 7. В расчетах конкретный вид математической модели формулы (Б.6) и m выбирали по рекомендациям [257, 259] для каждого элемента ПАЭПН, а время требуемой безотказной эксплуатации ПАЭПН задавалось 10 лет, что перекрывает период между техническим диагностированием большинства типов технологического оборудования [11, 252 и др.]. Результаты полученных расчетов подтверждают, что управление режимом работы дублирующих линий ПАЭПН позволяет обеспечить заданный расчетный срок службы. Кроме этого возможны комбинации режима работы ПАЭПН во время эксплуатации по мере необходимости. Так, например, пусть I режим работы ПАЭПН с тремя дублирующими

линиями был основной до выхода из строя в локационной антенне ПАЭПН А и Б (рисунок Б1а) с образованием неконтролируемой зоны (заштрихованная область). Для исключения которой сразу после обнаружения потери работоспособности антенной группы смежные ПАЭПН В и Г (рисунок Б1б) переводятся в режим II или III. Все остальные ПАЭПН при этом могут оставаться в режиме работы I. Возможны и другие варианты, однако в их перечислении нет особого смысла, так как все они реализуются на базе основных вариантов подключения I, II и III.

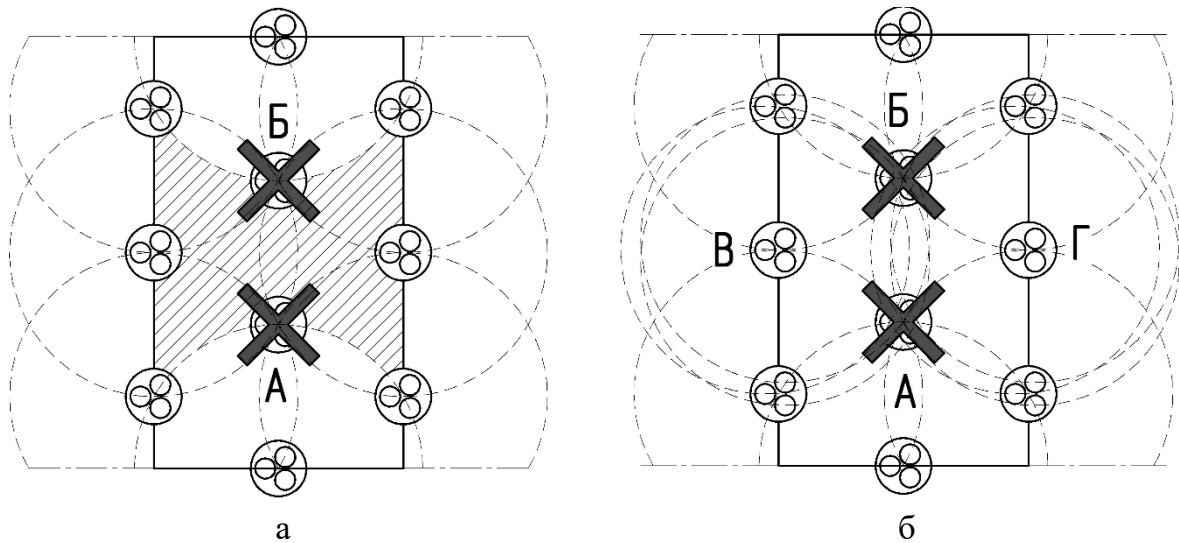


Рисунок Б1 - Пример компенсации потери работоспособности антенной группы переводом рабочих ПАЭПН в другой режим работы.

Рабочие технические характеристики ПАЭПН определялись экспериментально в соответствии с [95] на собранном в НИО-2 Тольяттинского государственного университета специализированном исследовательском стенде оценки рабочих характеристик элементов и блоков АЭ систем с применением следующих основных средств: генератор калиброванных акустических импульсов MSAE UCA01 (ООО «Микросенсорс АЭ», г.Саров) [217]; генератор сигналов WaveStation 2012 (Teledyne LeCroy, США); стабилизированный источник питания GPR-71820HD (GW Instek, Китай); цифровой мультиметр 289 (Fluke Corporation, США); блок развязки сигнал-питание БРСП (ТГУ, г.Тольятти); усилитель-фильтр MSAE-FA010 (ООО «Микросенсорс АЭ», г.Саров); цифровой осциллограф WaveRunner 44Xi-A (Teledyne LeCroy, США). Результаты измерений основных технических характеристик экспериментальной партии ПАЭПН при комнатной температуре сведены в таблицу Б1.

Таблица Б1

Наименование характеристики	Средние показатели партии*
Габаритные размеры ПАЭПН	ø33,7×50 мм
Материал корпуса ПАЭПН	08X18H10
Полная электрическая емкость ПАЭПН	0,1 мкФ
Средний ток потребления ПАЭПН	91,4±3,3 мА
Напряжение питания в сигнальном кабеле ПАЭПН	12 ^{+1,2/-8} В
Максимальная потребляемая мощность ПАЭПН	1,5 Вт
Коэффициент предварительного усиления при рабочих: - трех дублирующих линиях - двух дублирующих линиях - одной линии	34 дБ 28 дБ 22 дБ
Среднеквадратичный уровень собственного шума ПАЭПН	9,3±0,1 мкВ
Коэффициент преобразования ПАЭПН (отн. 1 мкВ/м)	294,5±0,2 дБ
Класс преобразователя по чувствительности (РД 03-300-99)	IV
Число выбросов импульсной характеристики	92,7±5,7 шт.
Длительность импульсной характеристики ПАЭПН	2,8±0,4 мс
Основной период собственных колебаний ПАЭПН	0,03 мс
Энергия импульсной характеристики ПАЭПН	8,6 мкВ ² ·с
Диапазон рабочих частот	20÷80 кГц
Неравномерность амплитудно-частотной характеристики в диапазоне рабочих частот	14 дБ
* - партия экспериментальных образцов в количестве 10 штук. Результаты обработаны по методу Стьюдента с доверительной вероятностью 0,95.	

Исследования работоспособности и стабильности работы ПАЭПН при воздействии на него стационарной (установившейся) температурой проводились в диапазоне от плюс 65 °С до минус 65 °С с шагом 10 °С. Исследования проводились в климатической камере с применением следующих основных средств: генератор сигналов WaveStation 2012 (Teledyne LeCroy, США); генератор калиброванных акустических импульсов MSAE-UCA01 (ООО «Микросенсорс АЭ», г.Саров); стабилизированный источник питания GPR-71820HD (GW Instek, Китай); цифровой мультиметр 289 (Fluke Corporation, США); блок развязки сигнал-питание БРСП (ТГУ, г.Тольятти); усилитель-фильтр MSAE-FA010 (ООО «Микросенсорс АЭ», г.Саров); цифровой осциллограф WaveRunner 44Xi-A (Teledyne LeCroy, США); 2-х канальная АЭ система на базе платы АЦП PAC PCI-2 (Physical Acoustics Corporation / MISTRAS Holdings Company, США); стальной волновод диаметром 30 мм и длиной 300 мм; климатическая камера SFT3119 (Instron, Англия-США) с блоком управления нагревом и охлаждением климатической камерой в диапазоне от –350 до +100 °С, а также изотермической емкости для хранения

жидкого азота, блока измерения и поддержания температуры CP108986 (Instron, Англия-США) и термоэлектрическими преобразователями (термопары). Следует заметить, что на всем протяжении исследования (выход на температурный режим) велось непрерывное отслеживание изменения контрольных показателей работоспособности ПАЭПН. Для исключения влияния работы систем регулирования климатической камеры на однозначность измерений данные получали во время кратковременного полного отключения камеры. За время измерения из-за тепловой инерционности камеры, волновода и ПАЭПН изменение температуры в камере и скачков в контрольных показателях работоспособности ПАЭПН не происходило. Результаты измерений основных технических характеристик экспериментальной партии ПАЭПН при воздействии стационарной (установившейся) температурой приведены на рисунке Б2.

Термоциклическое нагружение ПАЭПН проводилось при тех же условиях, но с тем отличием, что температура в пределах испытания изменялась несколько раз по одинаковому циклу. Чтобы обеспечить термоудар скорость изменения температуры была выбрана максимально обеспечиваемой климатической камерой и составила 23,6 °С/мин (от -65 до +65 °С и обратно за 5,5 минут), время выдержки на крайних температурах диапазона термоциклирования выбиралось равным времени выхода ПАЭПН на установившийся режим работы (25 мин).

Время одного цикла термического нагружения составляло 61 минуту. Общее количество циклов теплового нагружения каждого ПАЭПН составляло 5 циклов, что с запасом, поскольку он предназначался для работы на промышленном оборудовании, эксплуатирующимся в условиях статического температурного режима. Поэтому рабочие условия ПАЭПН, подобные имитируемым, возможны только при выводе с последующим вводом оборудования в эксплуатацию после технического освидетельствования или ремонта, которых обычно бывает не более 1-2 в 10 лет. На всем протяжении исследования и после его окончания проводилось отслеживание изменения контрольных показателей работоспособности ПАЭПН (таблица Б1). Результаты контрольной проверки технического состояния ПАЭПН показали, что стрессовое тепловое нагружение в виде циклического перепада температур не привело к изменению их технического состояния и возникновению отказа.

Объем исследования стойкости конструкции ПАЭПН к механическим внешним воздействующим факторам (вибрация, удары, сейсмическое воздействие, качка, крен и др.) ограничивался его типом исполнения: М2 ГОСТ 30631-99.

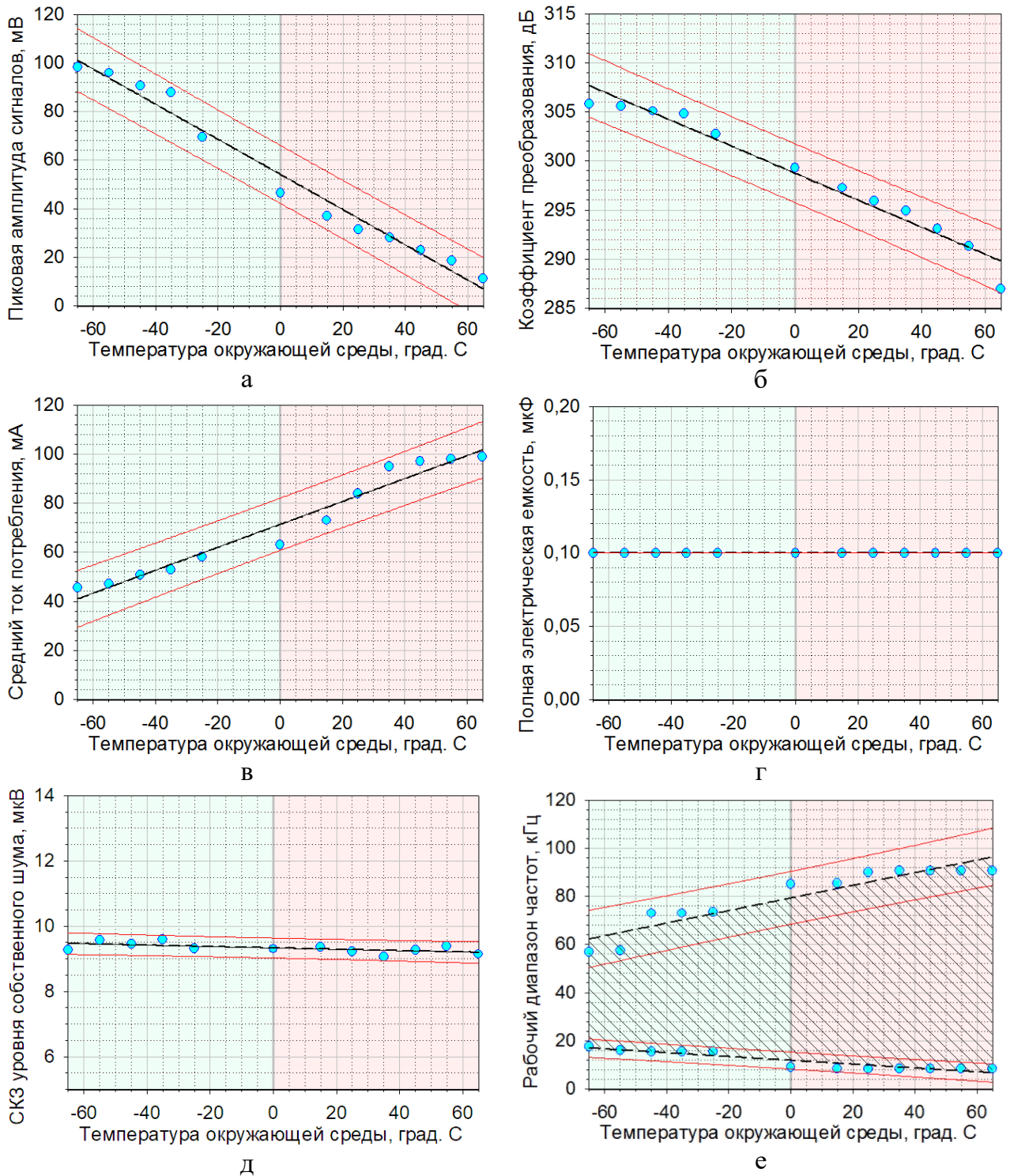


Рисунок Б2 – Изменение контрольных характеристик работы ПАЭПН в диапазоне рабочих температур с доверительным интервалом прогноза изменения характеристик ПАЭПН с вероятностью 0,95%.

Обозначенное исполнение подразумевает применение непосредственно на стенках статического оборудования, работающего без источников ударных воздействий и не связанных с такими источниками общими конструкциями, при максимальном внешнем механическом воздействии: синусоидальная вибрация в диапазоне частот 0,5÷100 Гц с

максимальной амплитудой ускорения до 5 м/с^2 ($0,5g$). Здесь помимо оценки сохранения работоспособности ПАЭПН также оценивалось изменение собственного уровня шума и появление сигналов-помех, вырабатываемых пьезоэлементами датчика при вибрации. Поскольку эти исследования не являются ресурсными, то длительность исследования равнялась времени выхода на установившийся режим работы исследовательской установки плюс время, необходимое для измерения уровня шума. Исследовательская установка включала в себя: гидравлическую динамическую испытательную машину 8872 (Instron, Англия-США) с модулем управления; 2-х канальная АЭ система на базе платы АЦП РАС PCI-2 (Physical Acoustics Corporation / MISTRAS Holdings Company, США). ПАЭПН перед началом исследований полностью электрически изолировался. Таким образом исключалось влияние электрических наводок и помех от испытательной установки на результаты исследований. Исследование стойкости конструкции ПАЭПН при максимальном внешнем механическом воздействии проводилось на четырех режимах в двух направлениях: I – когда ось ПАЭПН параллельна главному вектору воздействия; II – когда перпендикулярна.

Режимы внешнего механического воздействия представляли собой синусоидальные колебания ПАЭПН с максимальной амплитудой ускорения до 5 м/с^2 ($0,5g$) на частотах: 5; 35; 50 и 100 Гц. Синусоидальные колебания соответствующих режимов исследований задавались виброперемещением и частотой (Таблица Б2), которые пересчитывались из нормированных параметров по известному соотношению:

$$S = \frac{a}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2}, \quad (\text{Б.7})$$

Из сравнения данных таблицы Б2 видно, что при вибрационном воздействии собственный шум ПАЭПН повысился в 1,4 раза, т.е. на 3 дБ. Данная величина является приемлемой для выполнения АЭ контроля промышленных объектов. Однако следует иметь в виду, что реальная величина повышения собственного шума ПАЭПН имеет меньшее значение, т.к. при данном исследовании не учитывался шум, вызванный перемещением штока с гидравлическим приводом и шум работы клапанов сервопривода штока, измерение и учет которых представляет весьма сложную задачу.

С учетом обозначенных результатов и данных [252] проведена минимальная оценка возможности применения ПАЭПН в составе систем мониторинга и диагностики промышленных объектов с поддерживаемым рабочим температурным режимом в виде изотермических резервуаров. Результаты оценки сведены в таблицу Б.3.

Таблица Б2

Режим воздействия, №	Частота, f , Гц	Вибропере- мещение, S , мм	Виброускор- ение, a , м/с ²	Уровень собственного шума	
				в пике	среднее
Положение ПАЭПН I					
«stand-by»	0	0	0	40 мкВ	25 мкВ
1	5	5,0712	5	60 мкВ	35 мкВ
2	35	0,1035	5	60 мкВ	35 мкВ
3	50	0,0507	5	60 мкВ	35 мкВ
4	100	0,0127	5	60 мкВ	35 мкВ
Положение ПАЭПН II					
«stand-by»	0	0	0	40 мкВ	25 мкВ
1	5	5,0712	5	60 мкВ	35 мкВ
2	35	0,1035	5	60 мкВ	35 мкВ
3	50	0,0507	5	60 мкВ	35 мкВ
4	100	0,0127	5	60 мкВ	35 мкВ

Таблица Б.3

Рабочая среда	Температура кипения /хранения, °С	Категория ВО среды*	Основной материал объекта контроля	Частотный диапазон АЭ контроля	Коэфф. преобразова- ния
Бутан C_4H_{10}	-0,5	ПАТ2	09Г2С, 16ГС	10-80 кГц	298 дБ
Фреон R12B1 CF_2ClBr	-3,8	не ВО	09Г2С, 16ГС	12-78,5 кГц	299 дБ
Фреон R31 $CFCI_2$	-9	не ВО	09Г2С, 16ГС	12-76 кГц	300 дБ
Сернистый ангидрид, SO_2	-10,0	не ВО	09Г2С, 16ГС	12-76 кГц	300 дБ
Изобутан $(CH_3)_3CH$	-11,7	ПАТ1	09Г2С, 16ГС	13-76 кГц	300,1 дБ
Фреон R22B1 CF_2BrH	-15,7	не ВО	09Г2С, 16ГС	13-76 кГц	300,2 дБ
Фреон R13I1 CF_3I	-22,5	не ВО	09Г2С, 16ГС	14-74 кГц	301,5 дБ
Фреон R134A $C_2H_2F_4$	-26,3	не ВО	09Г2С, 16ГС	14-73 кГц	302,2 дБ
Фреон R12 CF_2Cl_2	-29,8	не ВО	09Г2С, 16ГС	14-71 кГц	302,8 дБ
Аммиак NH_3	-33,4	ПАТ1	09Г2С, 16ГС	15-70 кГц	302,8 дБ
Хлор Cl_2	-34,0	не ВО	09Г2С, 16ГС	15-70 кГц	302,8 дБ
Фреон R22	-40,0	не ВО	09Г2С, 16ГС	15-69 кГц	304,2 дБ

Рабочая среда	Температура кипения /хранения, °С	Категория ВО среды*	Основной материал объекта контроля	Частотный диапазон АЭ контроля	Коэфф. преобразования
CHF ₂ Cl					
Пропан C ₃ H ₈	-42,3	ПАТ1	09Г2С, 16ГС	15-69 кГц	304,2 дБ
Пропилен C ₃ H ₆	-47,7	ПВТ2**	09Г2С, 16ГС, 08Г2ФБ	16-66 кГц	305,6 дБ
Фреон R32 CF ₂ H ₂	-51,7	не ВО	08Г2ФБ	16-66 кГц	305,6 дБ
Фреон R13В1 CF ₃ Br	-57,7	не ВО	08Г2ФБ	16,5-63,8 кГц	305,9 дБ
Сероводород H ₂ S	-60,4	ПВТ3**	08Г2ФБ	16,5-63,8 кГц	305,9 дБ
<p>* – класс категории взрывоопасности (ВО) среды по энергии поджига атмосферы согласно ГОСТ 31610.0-2014 (IEC 60079-0:2011) или ТР ТС 012/2011.</p> <p>** - может быть применим, но требуется изменение маркировки и пересертификация на другую маркировку взрывозащиты.</p>					

Результаты исследования характеристик универсального акустического волновода

Для исследования были изготовлены два прижимных волновода: гладкий (классический) волновод и волновод оригинальной конструкции с 4-мя рассеивателями тепла. Последний являлся экспериментальным объектом исследования (опытный образец), а первый – объектом сравнения (эталон). Сечение волноводов было одинаково и рассчитано из условия обеспечения минимального искажения сигналов частоты промышленного контроля (до 150 кГц) при их передаче по волноводу. Данный расчет и подробное описание геометрического и материального исполнения опытного образца и эталона приведено в [A22, A27]. Общее описание опытного образца универсального волновода представлено в п. 7.3 Главы 7, а конструктивное исполнение показано на рисунке 7.3а Главы 7 и рисунке В1 настоящего приложения.

Теплорассеивающие характеристики универсального волновода исследовались на установке, включающей: нагревательный стол СВН13864 (TEMPCO Electric Heater Corporation, США); блок управления TPC-1000 (TEMPCO Electric Heater Corporation, США); термопару TRW00171 типа К-Г (TEMPCO Electric Heater Corporation, США); мультиметр DT-838 с термопарой типа К (ТЕК, Китай); тепловизор SC7700М (FLIR Systems, США); анемометр НР-816В (HoldPeak, Китай) и вентилятор. Исследования проводились при температуре воздуха в помещении $+25\pm 3$ °С и относительной влажности $63\pm 3\%$, что контролировалось психрометрическим гигрометром ВИТ-2 (АО «Стеклоприбор», г.Москва) и поддерживалось с помощью кондиционера. В исследованиях имитировались две ситуации охлаждения: ветер и штиль (естественная конвекция) при худшем варианте охлаждения волновода, когда ось волновода параллельна, а рассеиватели перпендикулярны вектору свободного падения (тепловому потоку). Имитация ветра проводилась с шагом 0,2 м/с до скорости 1,0 м/с, что было достаточным для оценки его работоспособности в худших условиях охлаждения. Поскольку возможности исследовательской установки были ограничены температурой $+300$ °С, а опытный образец - количеством вариантов исполнения (длины волновода, количество рассеивателей и расстояния между ними), то исследования были завершены путем математического моделирования всех остальных вариантов охлаждения в программе Siemens-NX8 (Siemens PLM Software, США) с применением метода конечных элементов. В расчетах варьировались: температура объекта контроля (до 500

°С с шагом 50 °С); температура окружающей среды (до 45 °С с шагом 10 °С), длина волновода (до 250 мм с шагом 50 мм), количество рассеивателей тепла (до 8 с шагом 1 при одинаковом расстоянии между рассеивателями 5 мм) и способы охлаждения (естественная конвекция и ветер или принудительное воздушное охлаждение направленные параллельно и перпендикулярно рассеивателям тепла до скорости 1,0 м/с с шагом 0,2 м/с). Верификация математической модели проводили путем моделирования условий проведенных экспериментальных исследований на исследовательской установке с последующим сопоставлением расчетных результатов с реальными. Расхождение составило менее 2% (рисунок В1 и В2а), что подтверждает достаточную для проведения подобных исследований точность математической модели. Для анализа преимуществ предлагаемой конструкции рассмотрим результаты исследования, представленные на рисунке В2, которые получены для худшего варианта охлаждения (естественная конвекция перпендикулярно рассеивателям волновода) при температуре окружающей среды +25 °С.

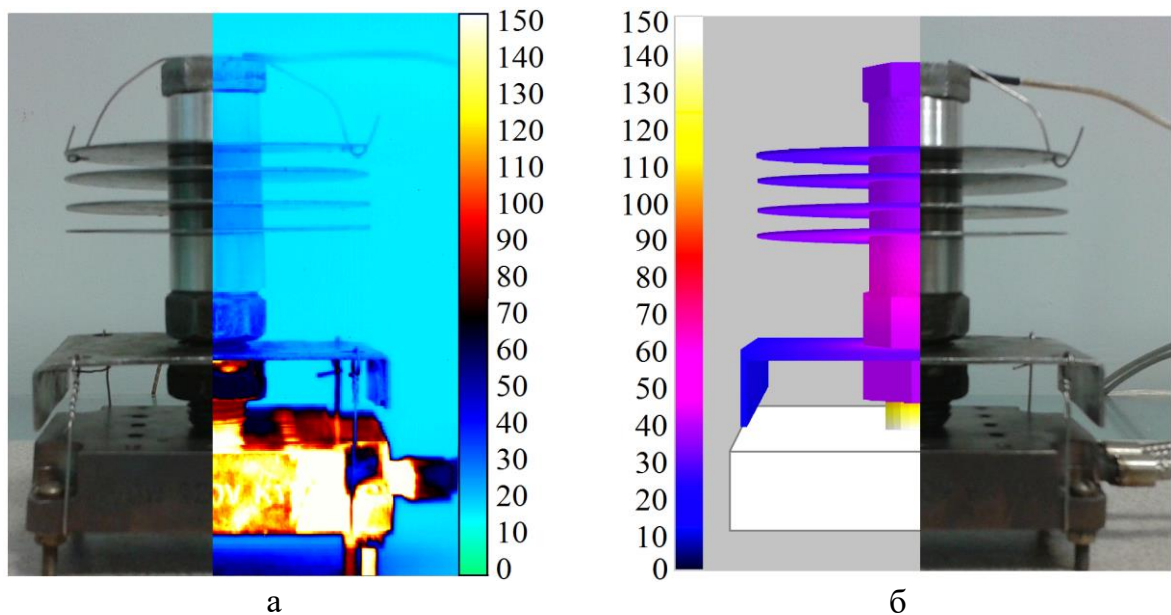


Рисунок В1 – Сравнение результатов исследования распределения тепловых полей на волноводе, полученное тепловизором экспериментально (а) и в программе расчетно (б)

На рисунке В2 приняты следующие обозначения: ▲ – экспериментальные данные (остальные расчетные); «Температура ОПО» – температура конца волновода у нагревателя (имитирующего стенку опасного промышленного объекта, сокращенно ОПО); «Температура ПАЭ» – температура второго конца волновода (место установки ПАЭ); N – количество рассеивателей тепла (вариант N = 0 соответствует гладкому

стержню); I – низкая вероятность выхода ПАЭ из строя (зона безопасной работы ПАЭ с ПУ); II – высокая вероятность выхода ПАЭ из строя ($+65 \div 85$ °С предельная зона работы ПАЭ с ПУ); III – зона потери работоспособности ПАЭ (зона гарантированного повреждения и отказа ПУ ПАЭ).

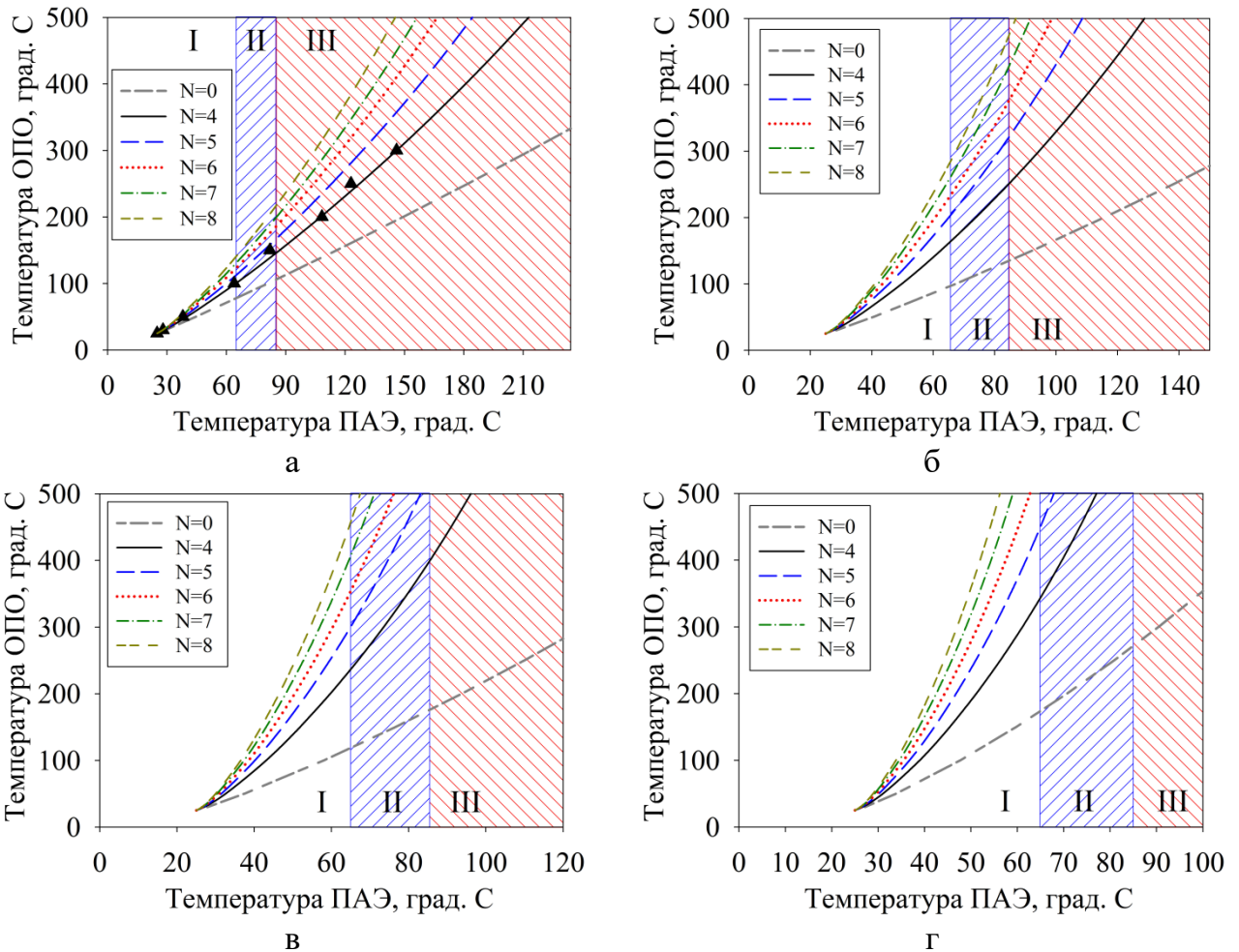


Рисунок В2 - Результаты исследования теплорассеивающих характеристик стержневого волновода (теплонагруженности ПАЭ) при температуре окружающего воздуха $+25$ °С и его длине: 100 мм (а), 150 мм (б), 200 мм (в) и 250 мм (г). Описание принятых на рисунке обозначений приведено в тексте.

Из рисунка В2а видно, что гладкий волновод длиной 100 мм без пакета рассеивателей ($N=0$) при температуре окружающего воздуха $+25$ °С может применяться при АЭ мониторинге и контроле промышленного объекта температурой не выше $+78$ °С. При наличии пакета теплорассеивателей предлагаемой конструкции температура применения того же волновода при тех же окружающих условиях повышается до: $+102$ °С при 4-х рассеивателях ($N=4$); $+115$ °С при $N=5$; $+125$ °С при $N=6$; $+132$ °С при $N=7$ и $+142$ °С при $N=8$, т.е. температура применения волновода повышается в $1,5 \div 2,1$ раза без изменения его длины. С увеличением длины волновода обозначенный

положительный эффект еще более усиливается. Так по рисунку В2 теплонагруженность ПАЭ до +65 °С можно обеспечить волноводом с шестью тепловыми рассеивателями (N=6) при длине стержня: 100 мм до температуры объекта контроля +125 °С; 150 мм до +230 °С; 200 мм до +350 °С и 250 мм до +500 °С. Тогда как волновод без рассеивателей (N=0) при длине 200 мм обеспечивает ту же теплонагруженность ПАЭ при температуре объекта контроля до +175 °С, что в 2,8 раз хуже.

Таким образом, варьирование длины волновода в сочетании с изменением количества рассеивателей тепла позволяет получить еще больший положительный эффект. Например, как было сказано выше, теплонагруженность ПАЭ до +65 °С обеспечивается волноводом длиной 100 мм с 4-мя рассеивателями (N=4) до температуры объекта +102 °С, а при длине волновода 250 мм и 9-тью рассеивателями (N=9) до температуры объекта +690 °С, т.е. рабочий диапазон расширяется в 6,7 раз. Тогда, как увеличение длины гладкого волновода со 100 до 250 мм расширяет температурный диапазон контроля в 2,2 раза (с +78 до +175 °С). Также полученные результаты показывают, что наиболее эффективным местом установки теплорассеивающего пакета на волноводе является его конец со стороны установки ПАЭ. Считаем, что обозначенные результаты возможно улучшить доработкой рассеивателей и подбором материала элементов теплорассеивающего пакета. Таким образом, предлагаемый акустический волновод является гибким техническим средством, который позволяет с ограниченным числом элементов адаптировать его под широкий температурный диапазон применения при минимальном габарите и весе обуславливающие удобство монтажа, эксплуатацию и транспортировку волновода (последнее возможно в разобранном виде).

Акустические характеристики универсального волновода оценивались по отличию затухания, искажения спектра и дисперсии скорости волн, возникающих от калиброванных сигналов при их прохождении через эталонный волновод и опытный образец на установке, включающей: генератор калиброванных акустических импульсов MSAE UCA01 (ООО «Микросенсорс АЭ», г.Саров); широкополосный пьезоэлектрический преобразователь акустической эмиссии AE-900S-WB (NF Electronics, Япония) с полосой пропускания до 1 МГц; предварительный усилитель-фильтр MSAE FA010 (ООО «Микросенсорс АЭ», г.Саров) и цифровой осциллограф WaveRunner 44Xi-A (Teledyne LeCroy, США) позволяющий записывать форму калиброванных сигналов прошедших через волновод. Из записи формы сигналов получали: пиковую амплитуду сигнала; спектр (дискретным преобразованием Фурье) и

спектрограмму (посредством вейвлет-преобразования). По отношению пиковых амплитуд во временной области оценивалось затухание сигналов. По расхождению в спектре сигналов оценивались искажения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) системы «волновод-ПАЭ», а по расхождению в спектрограммах – волновые трансформации. Первые две процедуры являются классическими, поэтому их описание не приводится. Третья процедура относительно новая и основана на экспериментальном определении дисперсионных кривых путем перевода расчетных дисперсионных кривых в координаты «частота/время» с последующим их масштабированием и сопоставлением с максимумами спектрограммы [150]. В качестве расчетных использовались дисперсионные кривые волн Похгаммера - Кри (L. Pochhammer - C. Chree), полученные для гладких цилиндрических стержней в [254]. Принцип работы генератора, излучения калиброванных акустических импульсов и процедура определения АЧХ преобразователя АЭ без и с волноводом описано в работе [217]. По результатам исследования акустических характеристик волновода сделаны следующие выводы.

Полученные средние амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) системы «волновод-ПАЭ» (рисунок В3) показывают, что опытный образец оказывает большее акустическое сопротивление проходящим сигналам по сравнению с гладким стержнем, но в диапазоне частот выше рабочего (более 150 кГц).

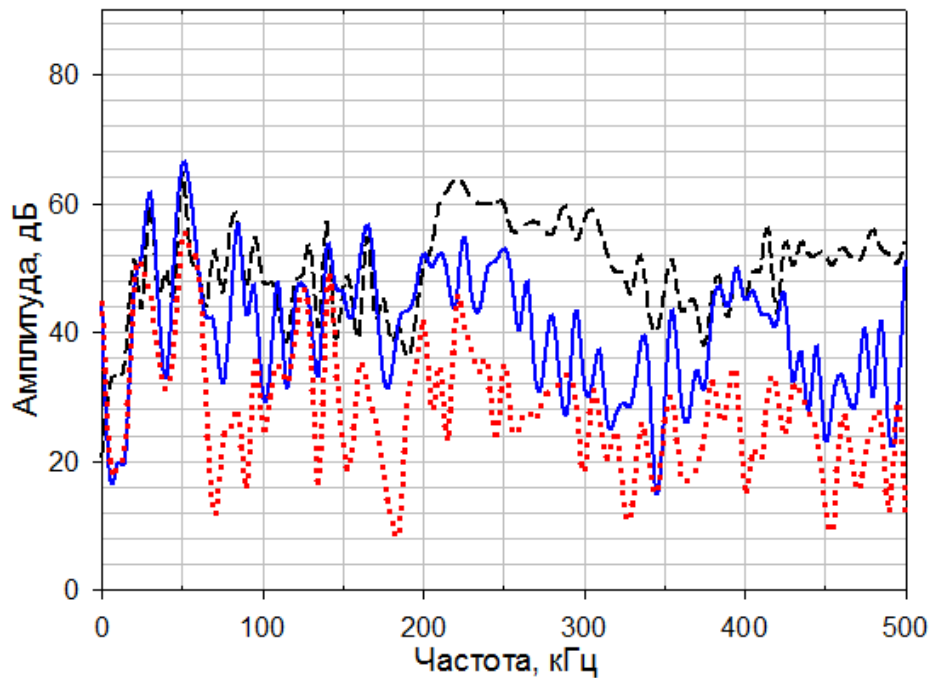


Рисунок В3 - Амплитудно-частотная характеристика широкополосного преобразователя АЭ без волновода (- - -), с эталонным стержневым волноводом (—) и с опытным образцом универсального волновода (.....).

В рабочем диапазоне имеется большой провал на АЧХ только в диапазоне 70÷90 кГц. Это также видно если сравнивать спектрограммы, приведенные на рисунках В4а и В4б. Учитывая практически идентичную конструкцию и минимальный контакт с рассеивателями тепла более высокое затухание опытного образца может быть связано с наличием резьбовой части. В работе [260] показано, что при попадании ультразвуковой волны на резьбовую часть происходит ее расщепление с образованием отраженных (вторичных) волн в количестве пропорционально количеству витков резьбы, попадающей в луч, а по амплитуде пропорционально высоте витка резьбы. Поэтому считаем, что согласованием параметров резьбы (высоты и шага зубьев) с частотным диапазоном АЭ контроля (длиной акустической волны) возможно улучшить частотную пропускную способность предлагаемой конструкции.

Экспериментальные дисперсионные кривые полученные при обозначенных выше измерениях представлены на рисунке В4.

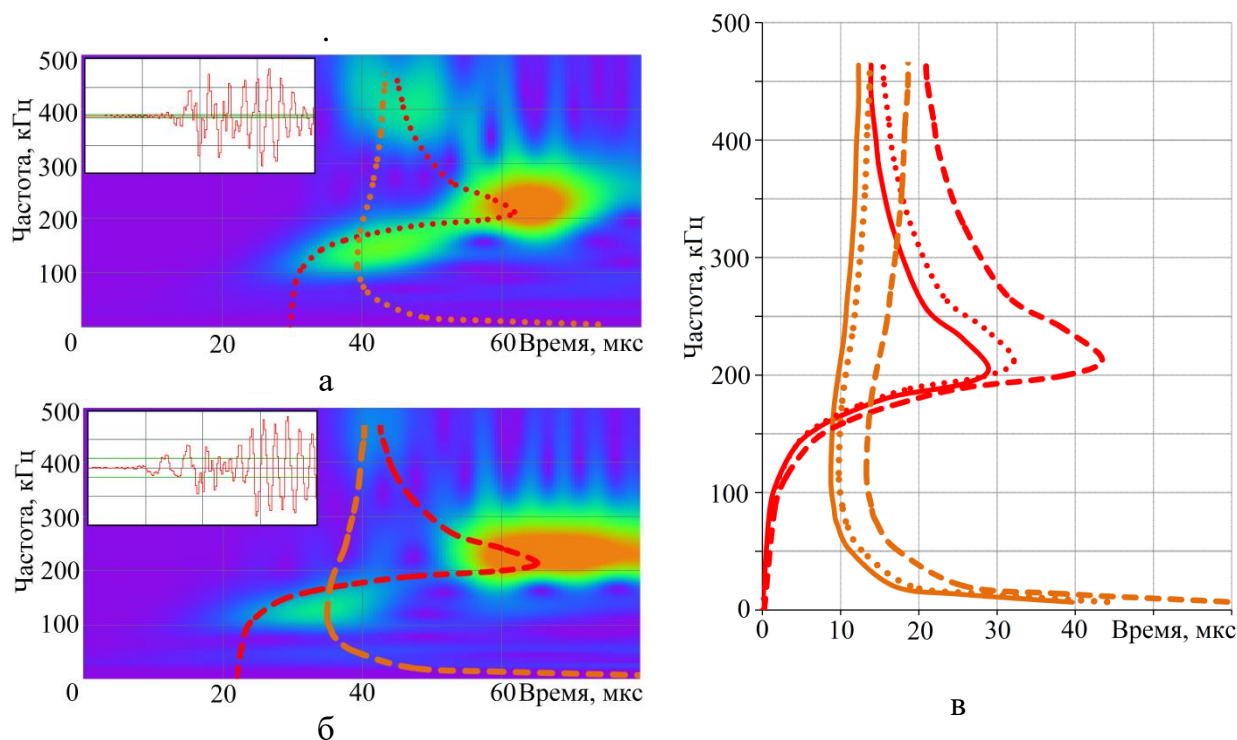


Рисунок В4 – Сопоставление экспериментальных дисперсионных кривых полученных в гладком стержне (а и в) и опытном образце (б и в) с расчетной для стержня того же диаметра, где: красная линия – мода S_0 , оранжевая – мода A_0 , (—) – расчетные, а (·····) и (- - -) – экспериментальные кривые для стержня и волновода соответственно. Во вставках в левом углу спектрограмм форма калиброванного импульса, прошедшего через волновод в координатах «Амплитуда-Время»

Из рисунка В4 видно, что расчетные и экспериментальные кривые для случая гладкого волновода практически совпадают. Для опытного образца общий характер

кривых совпадает, но имеется некоторая временная задержка. Логично, что причинами возникновения данного эффекта должны быть отличия от гладкого цилиндра, связанные с добавлением теплорассеивающего пакета, а именно наличие резьбовой части и анизотропии свойств в волноводе (зон сжатия и растяжения в зоне крепления теплорассеивающего пакета и вне ее). Отдельно влияние каждой из перечисленных составляющих на сдвиг времени прихода волн не изучалось, поскольку нет критического изменения в характере дисперсионных кривых. Следовательно, все имеющиеся теоретические выкладки, разработанные для подбора рабочего частотного диапазона, частоты среза и др. характеристик цилиндрических волноводов и обобщенные, например, в работе [254] и др. работоспособны и пригодны для оценки характеристик предлагаемой конструкции. Необходимо в расчетах только ввести коэффициент, учитывающий возникновение временной задержки. Следует также заметить, что согласно работе [261] в случае применения волновода при высоких температурах необходимо будет учитывать и временную задержку, возникающую из-за изменения упругих характеристик его материала. Между тем в настоящей работе предложено несколько вариантов закрепления теплорассеивающих пакетов (рисунок В5), позволяющих снизить указанный негативный эффект.

Несмотря на вышеописанное расхождение спектральных характеристик, величина затухания, вычисленная по пиковым амплитудам калиброванных сигналов, оказалась одинаковой и равной 8 дБ. Поскольку оба волновода прижимного типа, то это можно объяснить тем, что затухание проходящих акустических сигналов в основном определяется прохождением границы фаз «объект контроля–контактная среда–волновод». Здесь, как сказано было выше при описании конструкции, у универсального волновода есть преимущество в виде устройства задающего его усилие прижатия к объекту контроля. Чтобы понять положительный эффект от его применения было исследовано влияние усилия прижатия волновода на акустическую прозрачность контакта «объект контроля-волновод» при разных условиях смазывания.

Исследования влияние усилия прижатия волновода на акустическую прозрачность контакта «объект контроля-волновод» при разных условиях смазывания проводились по схеме, представленной на рисунке В6а, а испытательная установка, реализующая ее, состояла из: (1) – генератор калиброванных прямоугольных импульсов ГСПФ-053 (ЗАО «Центр АЦП Руднев-Шиляев», г.Москва), (2) – ПАЭ-излучатель, (3) – волновод ПАЭ излучателя, (4) – упругий прижим ПАЭ-излучателя, (5) – основание, (6) – ПАЭ-приемник, (7) – опытный образец волновода без рассеивателей, (8) – силовая проставка,

(9) – гайка, (10) – резьбовой прижим с упругим элементом, (11), (12) и (13) – соответственно траверса, тензометрический датчик силы и площадка для испытания материалов на сжатие разрывной машины Н50КТ (Tinius Olsen, Англия-США), (14) – предварительный усилитель ПАЭФ-014 (Интерюнис-ИТ, г.Москва), (15) – АЭ система A-Line 32D PCI-8 (Интерюнис-ИТ, г.Москва), (16) – компьютер управления разрывной машиной. Положения (2) и (6) представляли собой одинаковые полосовые ПАЭ промышленного исполнения, имеющие относительно равномерную АЧХ в диапазоне $50 \div 250$ кГц.

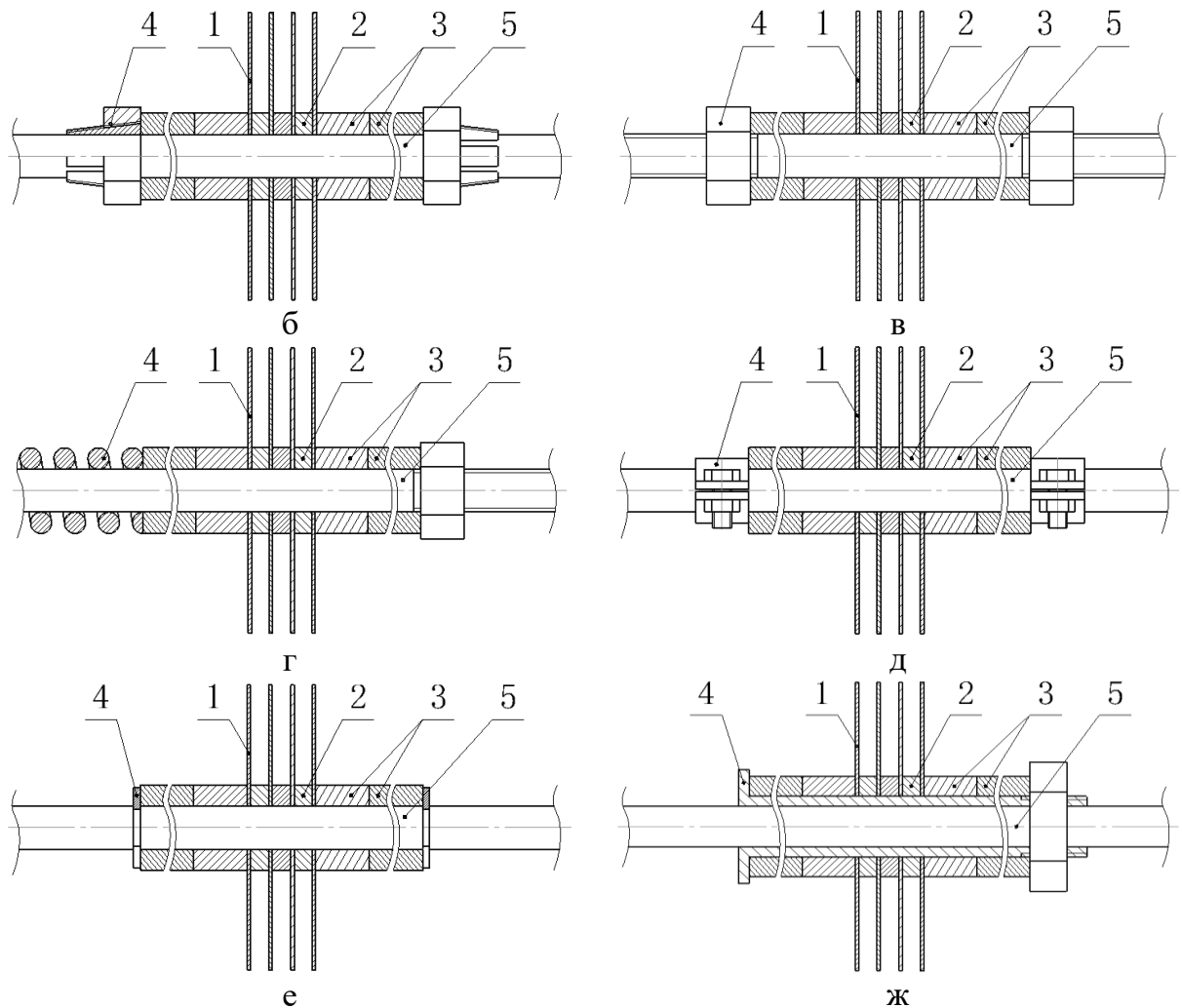


Рисунок В5 – Варианты закрепления рассеивателей тепла универсального акустического волновода. Обозначения элементов, как на рисунке 7.3 Главы 7.

Результаты исследований приведены на рисунке В6б, где: A_0 – средняя амплитуда входящих сигналов на исследуемый волновод (измерялась установкой ПАЭ 6 в положении I указанное на рисунке В6а), A_C и $A_Ж$ – соответственно амплитуда сигнала прошедших через исследуемый волновод (положение II на рисунке В6а) при сухом и

жидком (Литол-24) контакте; p – усилие прижатия волновода. Разброс амплитуды задающих импульсов A_0 не превышал 1 дБ.

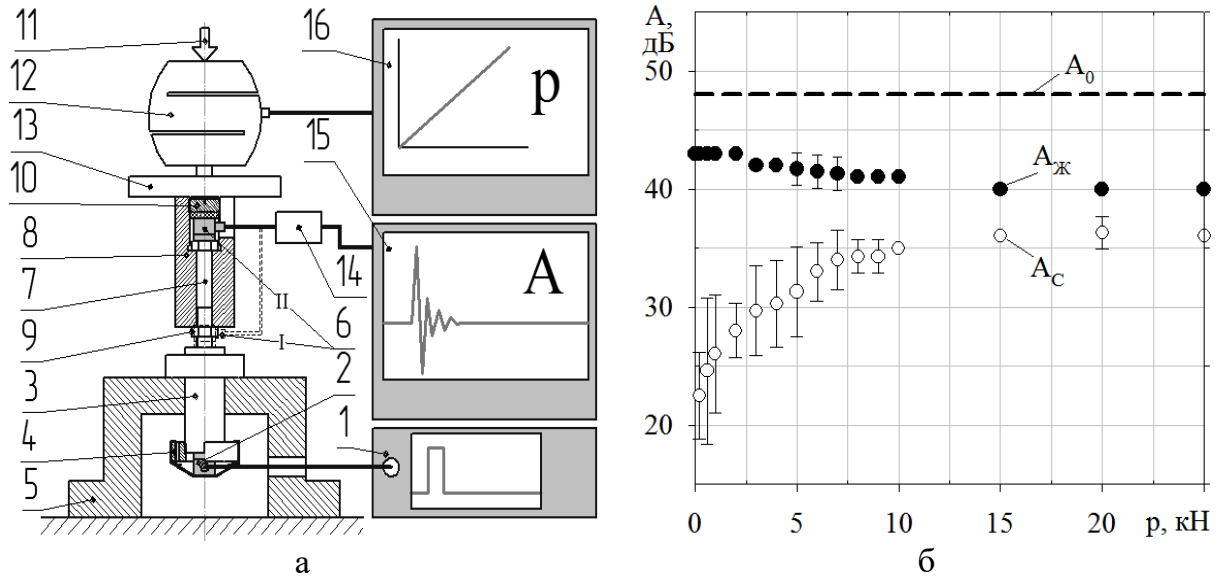


Рисунок В6 – Схема измерения (а) и результат (б) исследования влияние усилия прижатия волновода на акустическую прозрачность контакта «объект контроля-волновод» при разных условиях смазывания.

Из рисунка В6б видно, что при жидком контакте условия прохождения сигнала мало зависят от усилия прижатия (изменение в пределах 3 дБ). Сухой контакт влияет более существенно (в пределе полная потеря контакта), но лишь до усилия прижатия волновода 6 кН. При больших усилиях (от 6 до 25 кН) амплитуда сигнала от усилия прижатия изменяется незначительно (в пределах 3 дБ). Однако при этом разница между потерями в сухом и жидком контакте примерно постоянна и в среднем составляет 6,3 дБ. Таким образом, в случаях достаточного количества жидкой контактной среды при любом усилии прижатия и в сухом контакте при усиллии прижатия более 6 кН падение амплитуды сигналов в контакте можно считать независимым (в пределах 3 дБ) от изменения силы прижатия. Учитывая, что на практике применения волновода может быть заложено недостаточное количество контактной среды, то обеспечение усилие прижатия волновода становится гарантией акустического контакта. Следовательно, крепежно-натяжительные элементы основания-упора (позиция (7) рисунок 7.3б Глава 7) должны обеспечивать усилие более 6 кН. Исследование максимальных усилий прижатия волновода при использовании крепежно-натяжительные элементы различного вида проводилось по схеме, показанной на рисунке В7, где: (1) – универсальный волновод в сборе, (2) – основание-упор волновода, (3) – крепежно-натяжительные элементы основания-упора, (4) – преднатяжители, (5) – тензометрический датчик силы разрывной

машины H50KT 50 кН (Tinius Olsen, Англия-США), (6) – опорная плита датчика силы, (7) – вывод данных на компьютер управления разрывной машиной, (8) – упорная пластина, (9) – гаечный ключ. В исследованиях использовали стальные крепежно-натяжительные элементы основания-упора трех видов: проволока ($\varnothing 0,8$ мм), лента (4,6x0,36 мм) и шпильки (М6).

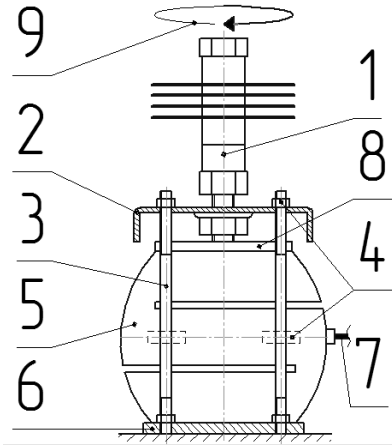


Рисунок В7 – Схема измерения максимального усилия прижатия волновода

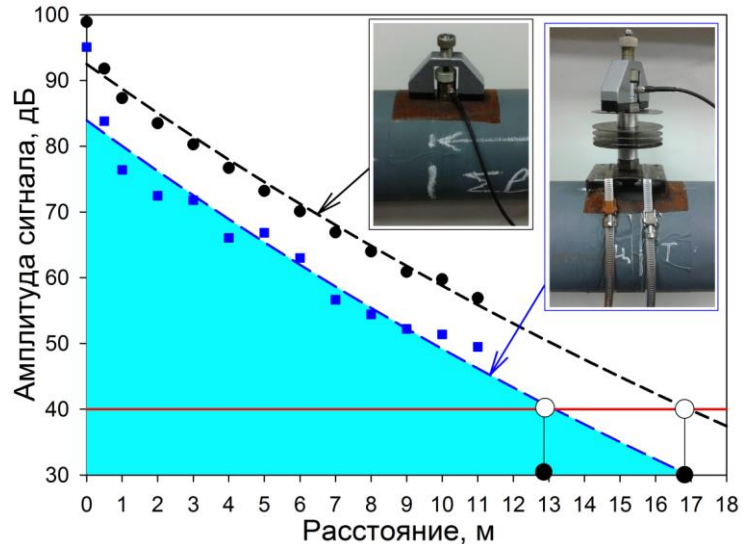


Рисунок В8 – Экспериментальные кривые затухания акустического сигнала в сухом трубопроводе, при его регистрации АЭ системой без волновода (●) и через волновод (■)

За максимальное усилие прижатия волновода принималось усилие, при котором происходили: деформация или обрыв крепежно-натяжительных элементов (3) или деформация основания-упора (2). Максимальное прижимное усилие, достигнутое при использовании: проволоки $\varnothing 0,8$ мм составило $0,6 \pm 0,2$ кН; ленты стальных хомутов (стяжек) сечением 4,6x0,36 мм - $2,0 \pm 0,5$ кН; шпилек М6 - $4,2 \pm 0,5$ кН. Однако по легкости и удобству монтажа волновода крепежно-натяжительные элементы выстроились в другом порядке: первое место – стальная лента; второе – стальные шпильки и третье – стальная проволока.

Апробация волновода в режиме АЭ контроля в соответствии с [10] проводилась в два этапа. Первый, в лабораторных условиях на универсально-исследовательском стенде (УУИС), разработанном в рамках данной работы и подробно описанном в п. 7.4 Главы 7. Второй, в реальных производственных условиях на следующем емкостном промышленном оборудовании: трубопроводы пара и горячей воды; трубопроводы и коллекторный ввод предпускового подогревателя трубчатой печи; калачи многопоточной печи каталитического риформинга; теплообменники и реактор контактного газа (Приложение Г).

Апробация показала наличие большего (чем полученное на генераторе калиброванных импульсов) затухания сигнала между вариантами АЭ контроля с волноводом и без него (рисунок В8) и составило 11 ± 3 дБ. Что объясняется отличием в акустических трактах экспериментальных схем. Поэтому при применении волновода для исключения возникновения «мертвых зон» локации требует компенсация затухания сигнала в волноводе уменьшением расстояния между ПАЭ в антенной решетке. Это создает неудобство в виде необходимости увеличения количества каналов регистрации АЭ в пересчете на один и тот же объект. Однако данная проблема для сегодняшнего уровня развития многоканальных АЭ систем не является критической. Более важным является потеря чувствительности АЭ контроля ($11,3$ дБ = в $3,67$ раза). Учитывая, что наиболее опасными в объектах контроля являются дефекты в виде трещин, то для примера оценим критичность потери чувствительности к данному типу дефекта. Известно [6, 112 и др.], что в некоторых материалах амплитуда АЭ сигнала (A) с некоторым коэффициентом (k) пропорциональна скачку трещины (Δl) как:

$$A = k \cdot (\Delta l)^{1,5}, \quad (\text{В.1})$$

Тогда если принять, что при АЭ контроле порог дискриминации АЭ равен 40 дБ (100 мкВ), то из (В.1) при $k=1$ получаем обнаруживаемый минимальный скачок трещины без волновода $\Delta l = 21,5$ мкм, с волноводом $\Delta l = 51,3$ мкм. Согласно данным [6] в первом и втором случае величина скачков трещины соответствует II стадии развития трещины (стадия роста микротрещин и образования макротрещин). Следовательно, несмотря на снижение чувствительности возможно выявить трещины до начала их активного роста и до наступления критической величины (разрушения объекта), а значит потеря чувствительности существует, но не является катастрофической.

Акты внедрения результатов работы

общество с ограниченной ответственностью

«ЛАЭС»

445041, г. Тольятти, ул. Куйбышева, 36 - 52, тел.(8482) 78-76-71

ИНН 6324015463 КПП 632401001 ОГРН 1106324009660 ОКПО 69087902 р/с № 40702810954400014064

в Поволжском Банке ПАО Сбербанк г.Самара БИК 043601607 к/с 30101810200000000607

№ _____

По месту требования

от « ____ » _____ 20____ г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Растегаева Игоря Анатольевича

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы Растегаева Игоря Анатольевича послужили основой при решении следующих научно-технических задач.

Разработан «Способ повышения точности локации шумоподобных источников акустической эмиссии на основе спектрально-временного самоподобия», который был использован для акустико-эмиссионного поиска и локализации течи в резервуаре хранения щелочи объемом 25 м³. На основании полученных положительных результатов данный способ включен в инструментарий лаборатории неразрушающего контроля ООО «ЛАЭС».

Разработан «Преобразователь акустической эмиссии повышенной надежности», который вошел в состав экспериментальной акустико-эмиссионной системы мониторинга технического состояния двухкорпусного изотермического резервуара жидкого аммиака. Это позволило выполнить требования Заказчика по расположению чувствительных элементов внутри резервуара, тем самым обеспечить контроль внутреннего (наиболее нагруженного) корпуса. У данного технического решения аналогов, пока, не существует.

Директор ООО «ЛАЭС»



А.К. Хрусталеv



Российская Федерация
Общество с ограниченной ответственностью
"ДИАГНОСТ"

445007, г. Тольятти, Самарская обл.,
ул. Ларина 147 В

№ _____ от _____ 20__ г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Растегаева Игоря Анатольевича

Настоящий акт подтверждает, что «Универсальный волновод акустической эмиссии» разработанный в рамках диссертационной работы Растегаева Игоря Анатольевича был использован в рамках технического диагностирования и экспертизы промышленной безопасности при проведении акустико-эмиссионного контроля нескольких промышленных объектов, среди которых: трубопроводы пара и горячей воды, трубопроводы и коллекторный ввод предпускового подогревателя трубчатой печи, калачи многопоточной печи каталитического риформинга, теплообменники и реактор контактного газа. При апробации волновод подтвердил свою работоспособность и универсальность, а также показал возможность его применения при предварительном планировании объема неразрушающего контроля высокотемпературных промышленных объектов после акустико-эмиссионного их мониторинга на рабочем режиме (до вывода на обследование), что не возможно без применения волноводов.

Директор ООО «Диагност»



П.Н. Зорин



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

(ТГУ)

ОКПО 55914968	Белорусская ул., 14, г. Тольятти,
ОГРН 1036300997567	Самарской обл., 445020
ИНН 6320013673	Телефон (8482) 54-64-24
КПП 632401001	Факс (8482) 53-95-22
	E-mail: office@tltstu.ru
	http://www.tltstu.ru

№ _____
на № _____ от _____

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Растегаева Игоря Анатольевича

Настоящий акт подтверждает, что «Универсальный учебно-исследовательский стенд изучения генерации и распространения акустических волн в элементах промышленных объектов от имитаторов реальных источников акустической эмиссии» разработанный в рамках диссертационной работы Растегаева Игоря Анатольевича был использован при выполнении научно-исследовательских проектов: № 14.577.21.0145 «Разработка научных принципов и интеллектуальных иерархических систем прогноза техногенных катастроф потенциально опасного промышленного оборудования» и № 14.586.21.0011 «Разработка технологических принципов непрерывного мониторинга и научных основ прогнозирования разрушения сталей и конструкций в условиях крайнего Севера». Также используется в курсах обучения и повышения квалификации специалистов неразрушающего акустико-эмиссионного контроля экспертных и диагностических организаций, и при апробации разрабатываемых в Тольяттинском государственном университете средств и методик акустико-эмиссионного контроля.

Проректор по НИД



С.Х. Петерайтис



Техническая дирекция
Служба по надежности

АКТ
о внедрении результатов диссертационной работы

Настоящий акт подтверждает, что разработанная Растегаевым Игорем Анатольевичем с соавторами «Экспресс-методика оценки акустико-эмиссионной активности цапф сушильных цилиндров картоноделательных машин» № МАЭК-СЦКДМ-001-2019 внедрена в Филиале АО «Группа ИЛИМ» г. Коряжма и используется при оценке поврежденности лицевых и приводных цапф сушильных цилиндров картоноделательных машин КДМ-3 и КДМ-4 Картонно-бумажного производства.

Начальник Лаборатории по технической диагностике



Д.В. Севастьянов

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ООО «ЛАЭС»

А.К. Хрусталев

"03" 2020г.



ЭКСПРЕСС-МЕТОДИКА
оценки акустико-эмиссионной активности цапф сушильных
цилиндров картоноделательных машин

МАЭК-СЦКДМ-001-2019

По Договору № К3733-19 от 07.02.2019 г.

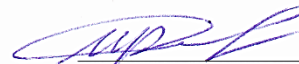
СОГЛАСОВАНО

Филиал АО «Группа ИЛИМ» г. Коряжма

РАЗРАБОТЧИКИ

ООО «ЛАЭС»

Начальник лаборатории, к.ф.-м.н.
 Специалист 2 уровня
 квалификации по АЭК

 И.А. Растегаев
 "05" "03" 2020г.

Руководитель службы по надежности

М.Н. Краснянский

"27" "02" 2020г.



Специалист 2 уровня
 квалификации по АЭК

 А.К. Хрусталев
 "05" "03" 2020г.

Тольятти, 2020г.

Копии патентов на изобретения

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2601270

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ
ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной ответственностью "ЛАЭС" (RU)*

Автор(ы): *Даниюк Алексей Валериевич (RU), Растегаев Игорь Анатольевич (RU), Виноградов Алексей Юрьевич (RU), Мерсон Дмитрий Львович (RU)*

Заявка № 2015145760

Приоритет изобретения **23 октября 2015 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **06 октября 2016 г.**

Срок действия патента истекает **23 октября 2035 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивашев Г.П. Ивашев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2665360

**УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ВОЛНОВОД СИГНАЛОВ
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

Патентообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
"ЛАЭС" (RU)*

Авторы: *Растегаев Игорь Анатольевич (RU), Мерсон Дмитрий
Львович (RU), Даниук Алексей Валериевич (RU), Афанасьев
Максим Анатольевич (RU), Хрусталеv Александр
Константинович (RU)*

Заявка № 2017127608

Приоритет изобретения 01 августа 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений


Российской Федерации 29 августа 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 01 августа 2037 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Извлев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2608969

**УНИВЕРСАЛЬНЫЙ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
СТЕНД ИЗУЧЕНИЯ ГЕНЕРАЦИИ И
РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В
ЭЛЕМЕНТАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ОТ
ИМИТАТОРОВ РЕАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тольяттинский государственный университет" (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2015147598

Приоритет изобретения 05 ноября 2015 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 30 января 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 05 ноября 2035 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2515423

**СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ЛОКАЦИИ
ШУМОПОДОБНЫХ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ
ЭМИССИИ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННОГО
САМОПОДОБИЯ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тольяттинский государственный университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012155130

Приоритет изобретения 20 декабря 2012 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 13 марта 2014 г.

Срок действия патента истекает 20 декабря 2032 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2684709

Способ акустико-эмиссионной диагностики динамического промышленного оборудования

Патентообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "Тольяттинский государственный университет" (RU)**

Авторы: **Растегаев Игорь Анатольевич (RU), Данюк Алексей Валериевич (RU), Аглетдинов Эйнар Альбертович (RU), Мерсон Дмитрий Львович (RU), Виноградов Алексей Юрьевич (RU)**

Заявка № 2018109645

Приоритет изобретения 19 марта 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 11 апреля 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 19 марта 2038 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

ТАМОЖЕННЫЙ СОЮЗ			
СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ			
	№ ТС RU C-RU.AT15.B.00873		
	Серия RU № 0502058		
<p>ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ Орган по сертификации продукции Общество с ограниченной ответственностью «РПН СФЕРА». Место нахождения (адрес юридического лица): 115114, город Москва, 1-ый Кожевнический переулок, дом 6, строение 1, помещение 28; адрес места осуществления деятельности: 115533, город Москва, проспект Андропова, дом 22, этаж 13, помещение 1; номер телефона: 84992717984; адрес электронной почты: info@rpn-cert.ru, аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.11AT15, дата регистрации 18.09.2014</p> <p>ЗАЯВИТЕЛЬ Общество с ограниченной ответственностью «ЛАЭС». Основной государственный регистрационный номер: 1106324009660. Место нахождения (адрес юридического лица): 445041, Российская Федерация, Самарская область, город Тольятти, улица Куйбышева, дом 36-52. Адрес (адреса) места осуществления деятельности по изготовлению продукции: 445020, Российская Федерация, Самарская область, город Тольятти, улица Белорусская, дом 14Б, офис 102. Номер телефона: 8(8482)787671. Адрес электронной почты: llc_laes@mail.ru.</p> <p>ИЗГОТОВИТЕЛЬ Общество с ограниченной ответственностью «ЛАЭС». Место нахождения (адрес юридического лица): 445041, Российская Федерация, Самарская область, город Тольятти, улица Куйбышева, дом 36-52. Адрес (адреса) места осуществления деятельности: 445020, Российская Федерация, Самарская область, город Тольятти, улица Белорусская, дом 14Б, офис 102.</p> <p>ПРОДУКЦИЯ Оборудование для работы во взрывоопасных средах: преобразователь акустической эмиссии повышенной надежности - приемник, тип ПАЭППП-20/80-3х1-d8/10. Продукция изготовлена в соответствии с 69087902.427372.00.TU «Преобразователь акустической эмиссии повышенной надежности - приемник ПАЭППП-20/80-3х1-d8/10. Серийный выпуск.</p> <p>КОД ТН ВЭД ТС 9031 80 380 0</p> <p>СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ Технического регламента Таможенного союза ТР ТС 012/2011 «О безопасности оборудования для работы во взрывоопасных средах»</p> <p>СЕРТИФИКАТ ВЫДАН НА ОСНОВАНИИ Протокола испытаний № Т393 LAB-EXP/11-16 от 14.11.2016 Испытательного центра технических средств Общества с ограниченной ответственностью «Прибор-Тест», аттестат аккредитации № RA.RU.21AГ33, акта о результатах анализа состояния производства № 2165/АП от 31.10.2016 органа по сертификации продукции Общество с ограниченной ответственностью «РПН СФЕРА», аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.11AT15 от 18.09.2014, технических условий 69087902.427372.00.TU, руководства по эксплуатации 69087902.427372.00.РЭ, паспорта 69087902.427372.00.ПС. Схема сертификации - 1с.</p> <p>ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ Стандарты, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований технического регламента, указаны в Приложении (бланк № 0348835). Условия хранения в соответствии с ГОСТ 15150-69. Срок хранения – не более 24 месяцев, срок службы – 10 лет. Описание конструкции и средств обеспечения взрывозащиты, специальные условия безопасного применения, а также иная информация, идентифицирующая продукцию, указаны в Приложении (бланки №№ 0348832, 0348833, 0348834, 0348835)</p> <p>СРОК ДЕЙСТВИЯ С 06.03.2017 ПО 05.03.2022 ВКЛЮЧИТЕЛЬНО</p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <p>Руководитель (уполномоченное лицо) органа по сертификации</p> <p>Эксперт (эксперт-аудитор) (эксперты (эксперты-аудиторы))</p> </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <p>Панкин Павел Викторович (инициалы, фамилия)</p> <p>Таймасова Татьяна Ивановна (инициалы, фамилия)</p> </td> </tr> </table> <p style="text-align: center; font-size: small;">М.П. (подпись) (подпись)</p> <p style="text-align: center; font-size: x-small;">Бланк изготовлен ЗАО «ОПЦИОН», www.opcion.ru (лицензия № 05-05-09/003 ФНС РФ), тел. (495) 720-4742, Москва, 2013</p>		<p>Руководитель (уполномоченное лицо) органа по сертификации</p> <p>Эксперт (эксперт-аудитор) (эксперты (эксперты-аудиторы))</p>	<p>Панкин Павел Викторович (инициалы, фамилия)</p> <p>Таймасова Татьяна Ивановна (инициалы, фамилия)</p>
<p>Руководитель (уполномоченное лицо) органа по сертификации</p> <p>Эксперт (эксперт-аудитор) (эксперты (эксперты-аудиторы))</p>	<p>Панкин Павел Викторович (инициалы, фамилия)</p> <p>Таймасова Татьяна Ивановна (инициалы, фамилия)</p>		

