

На правах рукописи



ПОПКОВ АРТЁМ АНТОНОВИЧ

**МЕТОДИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АКУСТИКО-
ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ**

05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ,
материалов и изделий»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» (СГУПС).

Научный руководитель: **Бехер Сергей Алексеевич**,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
«Электротехника, диагностика и сертификация»
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Сибирский государственный университет путей
сообщения»

Официальные
оппоненты: **Барат Вера Александровна**,
доктор технических наук, доцент кафедры
диагностических информационных технологий
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«МЭИ», г. Москва

Кинжагулов Игорь Юрьевич,
кандидат технических наук, преподаватель факультета
Систем управления и робототехники федерального
государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Национальный
исследовательский университет ИТМО», г. Санкт-
Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Алтайский государственный университет» (АлтГУ),
г. Барнаул


Защита диссертации состоится «24» сентября 2021 г. в 14.00 часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.0.077.02 (Д 999.230.02) в УдмФИЦ УрО РАН по адресу: 426067, г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в библиотеке и на сайте УдмФИЦ УрО РАН по адресу <http://udman.ru>.

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

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент

 Т. М. Махнева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Метод акустической эмиссии (АЭ) получил широкое распространение при контроле сосудов, резервуаров, аппаратов и трубопроводов давления за счет интегральности – способности контролировать объект неподвижно установленными преобразователями, возможности избирательного обнаружения дефектов и классификации их по скорости развития. Значительным преимуществом метода является непосредственная связь информативных параметров первичных сигналов преобразователей с процессами пластического деформирования и разрушения, образования и развития трещин.

Обязательным условием проведения контроля методом АЭ является нагружение объекта, создающее в его материале напряженно-деформированное состояние, которое обеспечивает развитие недопустимых дефектов. Контроль сосудов и аппаратов, работающих под давлением, осуществляется в процессе гидравлических или пневматических испытаний. Нагружение деталей, узлов и элементов конструкции осуществляется с использованием специализированных нагружающих устройств. Однако для объектов, статическое нагружение которых вызывает быстрое и неконтролируемое разрушение, применение метода АЭ ограничено.

В этих условиях актуальной задачей является расширение области применения метода АЭ для реализации возможности раннего обнаружения дефектов, развивающихся без заметной пластической деформации, в том числе в процессе эксплуатации под действием динамических и ударных нагрузок. Применение метода АЭ для обнаружения таких дефектов требует совершенствования и разработки методического, алгоритмического и программного обеспечения диагностических комплексов.

Степень разработанности темы исследования. На сегодняшний день наибольшее распространение получил АЭ контроль в процессе пневматических и гидравлических испытаний оборудования, работающего под давлением. Основы метода заложены и подробно освещены в работах Грешникова В.А., Дробота Ю.Б., Мерсона Д.Л., Иванова В.И., Бигуса Г.А., Кайзера Д., Поллока А., Данегана Х. К настоящему времени разработана нормативная и техническая документация, установлены требования к параметрам нагружения и к АЭ аппаратуре, стандартизированы критерии идентификации источников АЭ: локально-динамический, интегральный, амплитудный и другие.

АЭ контроль объектов, находящихся под действием механических нагрузок, получил меньшее распространение. Ограниченность его применения связана со сложностью идентификации источников сигналов от развивающихся дефектов на фоне помех, вызванных работой нагружающего устройства и его воздействием на объект контроля. В работах Степановой Л.Н. и Муравьева В.В. достаточно подробно исследованы закономерности АЭ при механических испытаниях ответственных объектов транспорта. Предложены критерии браковки, способы локации, идентификации и кластеризации источников АЭ, позволяющие обнаруживать развитие дефектов в деталях подвижного состава и элементах самолета в процессе механических испытаний.

Разработанные критерии предельного состояния конструкций, основанные на статистических закономерностях потоковых характеристик сигналов, представлены в работах Буйло С.И. Статистические величины (инварианты) позволяют обнаруживать магистральную трещину в материале на фоне сигналов пластической деформации. В работах Носова В.В. получены и обоснованы уравнения, связывающие накопление микрповреждений материала с параметрами АЭ сигналов. Эти технические решения дают возможность не только обнаруживать дефекты, но и оценивать остаточный ресурс конструкций по результатам АЭ контроля.

Однако некоторые вопросы метода АЭ разработаны недостаточно. Например, отсутствуют методы оптимизации комплекса информативных параметров сигналов для оценки свойств источника АЭ в зависимости от топологии, формы, размеров и свойств материала объекта контроля, что ограничивает возможности метода для объектов, имеющих сложную конфигурацию. Ограниченность применения метода для мониторинга объектов, склонных к хрупкому разрушению и находящихся под действием ударных нагрузок, связана с отсутствием способов выделения в общем потоке сигналов помех, вызванных непосредственно ударом, сигналов АЭ трения и сигналов, связанных с развитием дефектов.

Цель исследования – создание методик и алгоритмов для обработки сигналов, позволяющих обнаруживать развивающиеся без заметной пластической деформации дефекты методом АЭ в процессе ударного нагружения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1) исследовать закономерности АЭ при ударном нагружении образцов материалов, склонных к хрупкому разрушению;

2) исследовать пространственную корреляцию параметров сигналов АЭ для разработки критериев выбора информативных амплитудных параметров и разработать алгоритмы кластеризации источников АЭ по пространственной корреляции;

3) разработать алгоритмы фазовой локации источников дискретной АЭ и программное обеспечение для определения их координат в объектах с развитой протяженной трещиной, изменяющей пути распространения сигнала в объекте, что приводит к значительной погрешности алгоритмов локации, основанных на измерении разности времен прихода сигналов на преобразователи АЭ (ПАЭ);

4) разработать и реализовать в программном обеспечении алгоритмы временной кластеризации сигналов АЭ на основе анализа их статистических потоковых характеристик.

Идея работы заключается в расширении возможностей метода АЭ для объектов сложной топологии, создающей неоднозначность путей распространения волны, с ограниченным доступом к поверхности, склонных к хрупкому разрушению, за счет:

- применения ударного нагружения, которое позволяет локально достигать напряженно-деформированного состояния объекта без риска разрушения в области, наиболее подверженной дефектообразованию;

- идентификации групп сигналов АЭ по характеристикам источника на основе статистического распределения временных интервалов в общем потоке сигналов АЭ;

- использования фазового метода локации, позволяющего определять направление излучения источника, когда применение стандартизированных методов локации ограничено;

- использования анализа зависимости параметров сигналов от одного источника, зарегистрированных разными ПАЭ, для определения наиболее устойчивых к мешающим факторам параметров сигналов и их кластеризации.

Объект исследования – АЭ метод неразрушающего контроля.

Предмет исследования – алгоритмы обработки и параметры сигналов АЭ при ударном нагружении объектов с развивающимися дефектами.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) установлены временные параметры потоков сигналов при ударном нагружении объектов с хрупко развивающейся трещиной, позволяющие дифференцировать потоки сигналов, вызванные ударом, смещением кромок и ростом трещины; экспериментально показано, что сигналы от развивающейся

трещины фиксируются и после затухания колебательных процессов, а их временная зависимость описывается логарифмической функцией времени; постоянная времени в экспериментах превышала 150 с;

2) установлено, что корреляция сигналов на двух ПАЭ является индикатором связи параметров сигналов с контролируемым параметром источника, что позволяет обоснованно выбирать информативные параметры АЭ и проводить кластеризацию источников;

3) обоснована и экспериментально доказана возможность применения фазовой локации источников дискретной АЭ преобразователями, образующими акустическую антенну, размеры которой не превышают длину волны; разработан алгоритм локации источников дискретной АЭ по разности фаз сигналов, зарегистрированных разными ПАЭ, который может быть использован для контроля объектов с развитыми трещинами, нарушающими топологию объекта, в которых пути распространения не могут быть однозначно определены до проведения контроля;

4) установлено, что в общем потоке сигналов АЭ, вызванном хрупким ростом трещины, обнаруживаются группы сигналов, интервалы времени между которыми значительно отличаются от среднего интервала времени между сигналами в группе; разработан способ, основанный на теории проверки статистических гипотез, разделения потока регистрируемых сигналов на группы и их кластеризации по общности параметров распределений интервалов времени между сигналами.

Практическая значимость работы.

Разработан способ АЭ контроля (патент на изобретение RU 2676219 от 26.12.2018), который позволяет проводить контроль с использованием ударного нагружения объектов, склонных к быстрому и неконтролируемому хрупкому разрушению или объектов, полное нагружение которых невозможно или нецелесообразно.

Разработан способ оптимизации амплитудных параметров сигналов и кластеризации источников АЭ (патент на изобретение RU 2727316 от 21.07.2020), который использовался при контроле технологических трубопроводов при экспертизе промышленной безопасности компании ООО «Технология», что позволило снизить временные затраты на идентификацию источников АЭ при контроле протяженных объектов с размерами контролируемых зон более 10 метров.

Разработано программное обеспечение для фазовой локации источников дискретной АЭ, зарегистрированное в государственном реестре программ для ЭВМ (свидетельство №2017610809 от 18.01.2017), которое использовалось компанией ООО «НЭКС» для АЭ контроля сосудов и аппаратов, работающих под давлением, и обеспечило устойчивую локацию источников АЭ в процессе пневматических испытаний сосудов с ограниченным доступом к поверхности.

Разработано программное обеспечение для анализа зависимостей параметров сигналов АЭ и кластеризации источников, зарегистрированное в государственном реестре программ для ЭВМ (свидетельство №2021611019 от 20.01.2021), алгоритмы которого внедрены в программное обеспечение для акустико-эмиссионных систем СЦАД 16.03 и СЦАД 16.10 (ФГУП «СибНИА им. С. А. Чаплыгина») и используются при обработке результатов прочностных испытаний образцов из авиаматериалов и элементов авиационных конструкций в условиях повышенного уровня шумов и помех.

Методология и методы исследования. В работе использовались экспериментальные методы неразрушающего контроля: АЭ, тензометрический, визуально-оптический и измерительный. Численное моделирование и обработка сигналов проводилась методами цифровой фильтрации и математического анализа: преобразование Фурье, интегрирование, свертка. Для обработки экспериментальных данных применялись статистические методы: корреляционный и регрессионный анализ, теория проверки гипотез, методы максимального правдоподобия для определения параметров распределений случайных величин.

Положения, выносимые на защиту.

1. Закономерности АЭ при ударном нагружении объектов с хрупко развивающейся трещиной, включающие в себя три этапа формирования сигналов АЭ: упругие монотонно затухающие колебания от ударного воздействия (до 25 мс), разрушение кромок трещин и концентраторов напряжений (до 350 мс), замедленное разрушение с постоянной времени $\tau = (100...400)$ с, связанное с релаксацией деформаций по логарифмическому закону $\varepsilon = -a \cdot \text{Log}_{10} \left(\frac{t}{\tau} \right)$, что позволяет реализовать метод АЭ для обнаружения развивающихся дефектов в процессе ударного нагружения.

2. Методика оптимизации амплитудных параметров сигналов и кластеризации источников АЭ, основанная на пространственной корреляции параметров сигналов; теоретически доказано, что коэффициент корреляции между параметрами сигналов, зарегистрированных разными преобразователями,

равен единице $\text{corr}(P_{AE1}, P_{AE2}) = 1$ тогда и только тогда, когда коэффициенты корреляции между параметрами сигналов и параметром источника P_S равны единице $\text{corr}(P_{AE1}, P_S) = 1$ и $\text{corr}(P_{AE2}, P_S) = 1$; использование методики позволяет в 1,5 раза повысить количество информативных сигналов, по сравнению с кластеризацией по местоположению источника, определяемому по разности времен прихода.

3. Методика фазовой локации источников дискретной АЭ близкорасположенными ПАЭ для определения угловых координат источников дискретной АЭ (погрешность в экспериментах не превышала 9°), расширяющая возможности метода АЭ для контроля объектов с развивающимися трещинами, нарушающими пути распространения сигналов.

4. Закономерности потока сигналов АЭ хрупко развивающейся после ударного воздействия трещины, заключающиеся в том, что нестационарный поток состоит из пуассоновских групп сигналов, в которых распределение временных интервалов описывается экспоненциальным распределением; алгоритмы обработки потока сигналов, основанные на статистических критериях проверки гипотез и обеспечивающие кластеризацию сигналов в группы, вызванные ростом и трением берегов трещин, на фоне сигналов от ударов и сигналов трения в местах крепления объекта контроля.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности «05.11.13 Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»:

п.1. Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий;

п.6. Разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки информативных сигналов и представление результатов в приборах и средствах контроля, автоматизация приборов контроля.

Достоверность результатов работы обеспечивается корректностью постановки задач, их строгой физической обоснованностью, логической взаимосвязью полученных экспериментальных данных, применением современных и метрологически обеспеченных измерительных приборов и общепринятых методов обработки результатов. Достоверность подтверждается непротиворечивостью и воспроизводимостью результатов, совпадением результатов экспериментов и расчетов.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: X международной научно-технической конференции

«Политранспортные системы» (г. Новосибирск, ноябрь 2018 г); Международной научно-практической конференции «Инновационные факторы развития транспорта. Теория и практика» (г. Новосибирск, октябрь 2017 г); IV Международная конференция по инновациям в неразрушающем контроле «SIBTEST 2017» (г. Новосибирск, июнь 2017 г); IX международной научно-технической конференции «Политранспортные системы» (г. Новосибирск, ноябрь 2016 г); X международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, май 2016 г); IX международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, декабрь 2015 г); VIII Международной научно-технической конференции в рамках года науки Россия – ЕС «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке» (г. Новосибирск; ноябрь 2014 г).

Личный вклад автора. Выбор направлений и методов исследований, форм представления результатов, формирование структуры и содержания работы, формулирование основных положений. Автор сформулировал цель и задачи исследования; оптимизировал модели АЭ при развитии трещины в объектах, склонных к хрупкому разрушению; провел экспериментальные исследования, проанализировал и выполнил математическую обработку результатов; разработал алгоритмы и программное обеспечение для обработки результатов АЭ контроля.

Публикации по теме диссертации. По результатам работы опубликованы 20 статей в научных изданиях, в том числе три статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ, две из которых в SCOPUS и WoS, получено семь патентов РФ на изобретения, два свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 109 наименований. Диссертация изложена на 129 страницах, содержит 87 рисунков и 1 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы и степень проработанности темы исследования, определены задачи и цель, сформулированы положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проанализировано современное состояние метода АЭ и модели формирования потока сигналов АЭ, используемых для интерпретации результатов АЭ контроля: теория пластического течения, кинетическая теория прочности, статистические и феноменологические теории. Определены получившие распространение информативные параметры сигналов АЭ, выполнен анализ методов и средств обработки сигналов, ограничений и возможностей программно-технических средств, используемых для проведения АЭ контроля, и перспективные направления развития.

Во второй главе представлены результаты исследований корреляционной связи параметров сигналов, зарегистрированных разными ПАЭ от одного источника, и ее использование для решения задачи выбора информативных параметров сигналов, кластеризации и фазовой локации источников АЭ. В рамках предложенной линейной модели параметра сигнала P_{AE} с аддитивной Δ и мультипликативной δ неопределенностями выполнен аналитический анализ корреляционной связи параметров сигналов и источника:

$$P_{AE} = (a + \delta) \cdot P_S + (b + \Delta), \quad (1)$$

где P_{AE} – параметр сигнала; P_S – параметр источника; a и b – постоянные коэффициенты; δ , Δ – случайные флуктуации параметра сигнала, вызванные влиянием мешающих факторов, не коррелирующих с P_S .

В результате решения аналитической модели доказано, что коэффициент корреляции параметров сигналов, зарегистрированных разными ПАЭ, равен единице $corr(P_{AE1}, P_{AE2}) = 1$ тогда и только тогда, когда коэффициенты корреляции параметров сигнала с параметром источника P_S равны единице $corr(P_{AE1}, P_S) = 1$, $corr(P_{AE2}, P_S) = 1$. Таким образом, корреляция сигналов на двух ПАЭ является индикатором связи параметров сигналов с контролируемым параметром источника и может быть использована для обоснованного выбора информативных параметров при решении конкретной научно-технической задачи по организации АЭ контроля и кластеризации источников.

Экспериментальные исследования проводились на стеклянных листах размерами $200 \times 300 \times 2$ мм по ГОСТ 111-2014, стальных пластинах $1000 \times 1000 \times 5$ мм из стали Ст3 по ГОСТ 380-2005, сосудах давления диаметром 220 мм и длиной 1150 мм, изготовленных из стали 20 по ГОСТ 1050-2013 с толщиной стенки 6 мм, трубопроводах высокого давления 108×4 мм, изготовленных из стали 09Г2С. В качестве источников АЭ применялись: электронный имитатор с амплитудой от 0,5 до 30 В и длительностью переднего фронта не более 1 мкс, имитатор Су-Нильсена по ГОСТ Р ИСО 22096-2015,

реальные источники сигналов при ударном нагружении стекла и при гидравлических испытаниях сосудов давления (пат. RU 2650357 от 11.04.2018). Сигналы АЭ регистрировались диагностической цифровой АЭ системой СЦАД 16.03 (№18892-05 в Госреестре) с пороговым уровнем регистрации 5 мкВ.

Экспериментально установлено, что значение коэффициента корреляции для разных амплитудных параметров находится в диапазоне от 0,5 до 0,99. В стальных объектах, размеры которых не превышают 1 м, максимальная корреляция наблюдается для параметра *MARSE* и среднеквадратического отклонения формы сигнала, коэффициент корреляции составляет более 0,99 (рисунок 1, б), а минимальная – для амплитуды сигнала с коэффициентом корреляции менее 0,94 (см. рисунок 1, а).

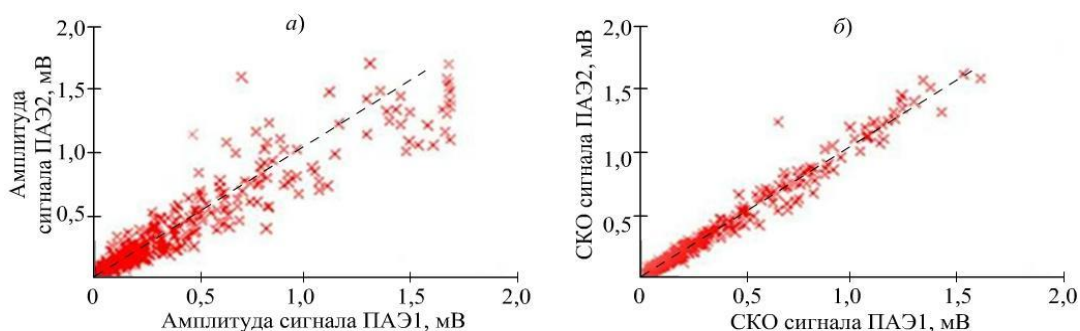


Рисунок 1 – Взаимозависимость амплитуды (а) и СКО формы сигналов (б), зарегистрированных ПАЭ1 и ПАЭ2

На основе установленных закономерностей разработана методика кластеризации сигналов АЭ, основанная на нормализации зависимостей вида $y = a \cdot x$, где a – коэффициент пропорциональности, y , x – параметры сигналов, зарегистрированных разными ПАЭ. Данные на рисунке 2, а получены при ударном нагружении стекла с трещиной с несколькими источниками АЭ. Нормализация включает в себя переход от линейного масштаба к логарифмическому $\ln(y) = \ln(x) + \ln(a)$ (см. рисунок 2, б) и поворот осей на 45° против часовой стрелки вокруг центра координат (см. рисунок 2, в).

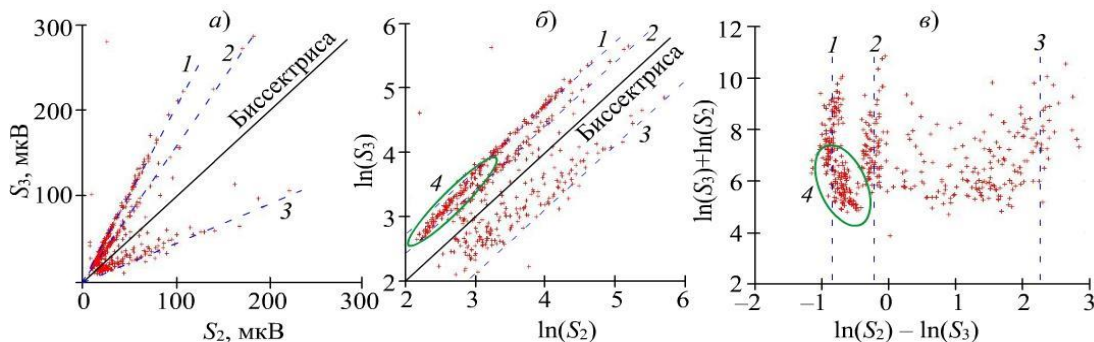


Рисунок 2 – Взаимозависимость СКО формы сигналов с разных ПАЭ: а) в пропорциональных осях; б) в логарифмических осях; в) в логарифмических осях, повернутых на 45° против часовой стрелки вокруг центра координат

Логарифмирование переводит мультипликативную составляющую a в аддитивную $\ln(a)$ (см. рисунок 2, б), а поворот – в смещение вдоль оси абсцисс (см. рисунок 2, в). Сигналы АЭ представлены на рисунке 2, в точками, формирующими вертикальные линии 1, 2 и 3, отличающиеся друг от друга смещением $\ln(a)$. Линии позволяют идентифицировать источники АЭ, а наблюдаемый разброс сигналов зависит от выбранного параметра и его корреляции на разных ПАЭ. При малых амплитудах сигналов, близких к уровню шумов, наблюдаются отклонения от прямой (поз. 4 на рисунке 2, в), которые в отдельных случаях могут быть скорректированы программными средствами.

Для визуализации и оценки достоверности алгоритма кластеризации построены карты локации источников в программном обеспечении системы СЦАД-16.03 (рисунок 3 а, в) для двух потоков сигналов, вызванных последовательными ударами по образцу с трещиной. Одновременно на рисунке 3, б, г представлены двумерные цветные карты распределения количества источников АЭ по значениям коэффициента $\ln(a)$, рассчитанным по СКО формы сигналов с разных ПАЭ. По результатам эксперимента количество сигналов, кластеризованных с использованием предложенного алгоритма по амплитудным параметрам сигналов, в 1,5 раза превышает количество локализованных по времени прихода, что связано с меньшей неопределенностью алгоритмов кластеризации низкоамплитудных сигналов по сравнению с алгоритмами локации.

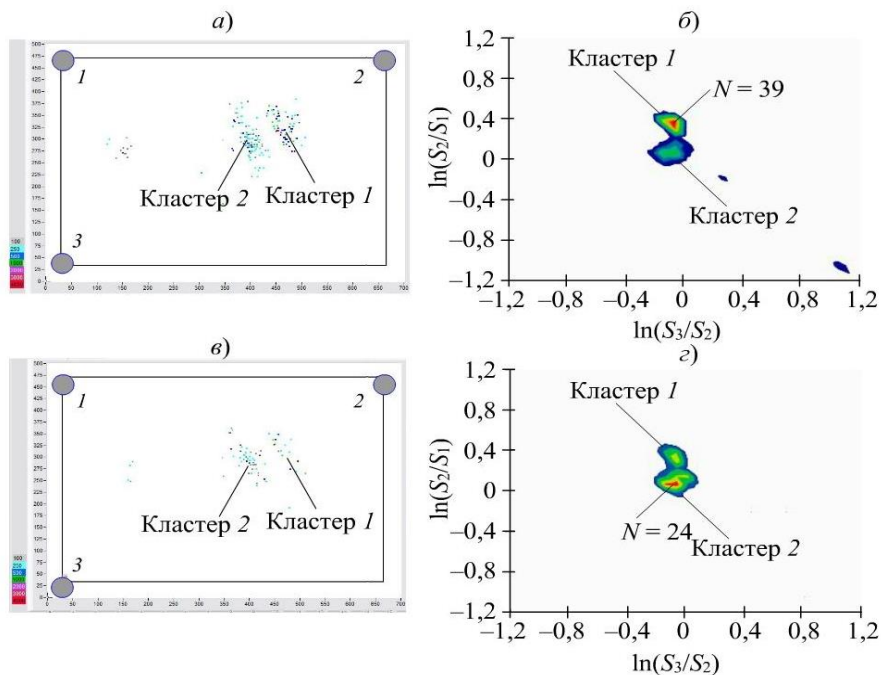


Рисунок 3 – Кластеризация источников АЭ при ударном нагружении листового стекла двумя последовательными ударами: локация по времени прихода (а, в) и по зависимости СКО формы сигналов на двух парах ПАЭ (б, г)

Разработана методика фазовой локации сигналов АЭ и алгоритмы определения направления на источник АЭ с использованием близкорасположенных ($l < \lambda$) ПАЭ. Для определения зависимости направления распространения акустической волны от разности фаз на ПАЭ разработана модель пьезоантенны (рисунок 4), состоящей из трех ПАЭ, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга, которое меньше длины волны сигнала АЭ для обеспечения однозначности результатов сдвига фаз.

Модель пьезоантенны, представляет собой равносторонний треугольник, в вершинах которого расположены ПАЭ. В качестве обязательных условий моделирования определено, что ПАЭ имеют одинаковые амплитудно-частотные характеристики, в пределах пьезоантенны материал является полностью однородным и акустическая волна не меняет своих свойств и характеристик.

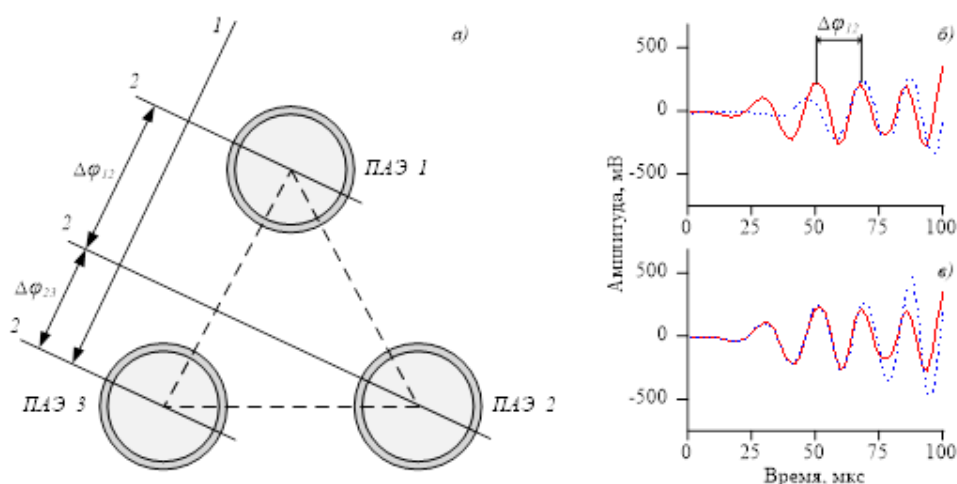


Рисунок 4 – Модель прохождения акустической волны через ПАЭ (а), формы зарегистрированных (б) и совмещенных с учетом сдвига (в) сигналов, где l – направление волны; 2 – фронт волны; $\Delta\varphi$ – разность фаз.

По условиям моделирования расстояние до источника значительно превышает расстояния между ПАЭ, поэтому, пренебрегая кривизной фронта, волна считается плоской. В идеальных условиях каждый ПАЭ регистрирует идентичные по форме сигналы, сдвинутые во времени относительно друг друга. Для определения разности фаз разработан и реализован в программном обеспечении (свидетельство о регистрации программ для ЭВМ №2017610809 от 18.01.2017 г.) алгоритм, основанный на поиске максимума значений коэффициента корреляции сигналов АЭ (Дефектоскопия, 2020. №11. С.28-37). Угол между направлением на источник АЭ и прямой, соединяющей два базовых ПАЭ, определяется как:

$$\alpha = NAC = 90^\circ - \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\Delta\varphi_1}{\Delta\varphi_2} + \frac{1}{2} \right) \right) + \pi \cdot n. \quad (2)$$

Для рассматриваемой модели фазовой локации направление распространения АЭ в контролируемом объекте пропорционально отношению разности фаз сигналов, зарегистрированных ПАЭ, и не зависит от частоты и скорости распространения волны (пат. RU 2648972 от 28.03.2018). Применение методики фазовой локации источников АЭ близкорасположенными относительно длины волны ПАЭ позволило определить направления источника АЭ с абсолютной погрешностью угла не более 9° .

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований закономерностей АЭ при ударном нагружении. Разработана установка для проведения ударных испытаний (рисунок 5), где в качестве исследуемых объектов использовались образцы из листового стекла.

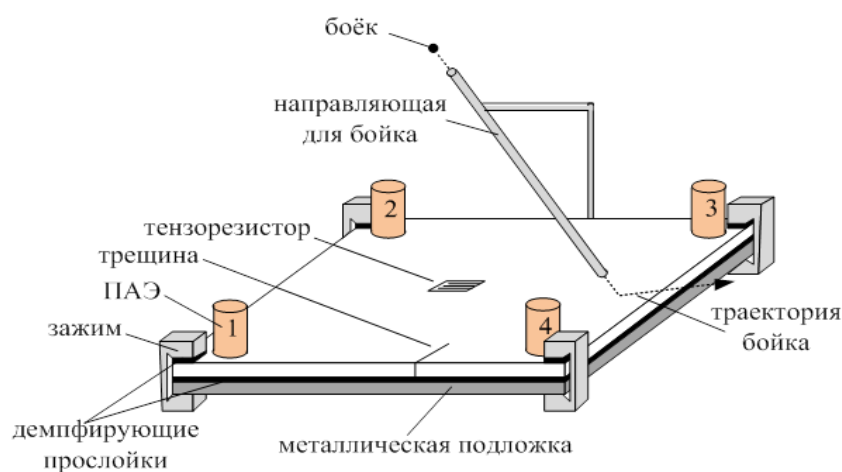


Рисунок 5 – Установка для экспериментальных исследований АЭ при ударном нагружении образцов листового стекла

В дефектных образцах по центру длинной кромки листа предварительно создавалась трещина длиной 10-15 мм. Стекланные листы фиксировались на металлической подложке толщиной 2 мм с помощью зажимов по углам листа. Между рабочей поверхностью зажимов и поверхностью листа, а также между листом и металлической подложкой располагались демпфирующие прокладки. Нагружение осуществлялось ударами стальными шариками – бойками массой 7 г и диаметром 12 мм, падающими с высоты 0,2 – 0,7 м. Место и направление воздействия выбирались так, чтобы не допустить повторного падения бойка на стекло. Для выбора направления удара использовалась алюминиевая трубка, ориентированная под углом $40-60^\circ$ к поверхности образца.

На расстояниях 10 мм от углов листа устанавливались четыре ПАЭ типа ПП-01-07 с полосой пропускания от 0,1 до 0,7 МГц в виде прямоугольной пьезоантенны. Для измерения напряжено-деформированного состояния в центр листа перпендикулярно направлению роста трещины наклеивался проволочный

тензорезистор типа ПКС-12-200 (№ 37343-08 в Госреестре) с номинальным сопротивлением $R = 200$ Ом, базой $L = 12$ мм и коэффициентом тензочувствительности $K = 2,12$, который подключался к измерительной системе в режиме «одиночный тензодатчик» (пат. RU 2625256 от 12.07.2017). Сигналы с тензодатчиков регистрировались измерительным микропроцессорным быстродействующим тензометрическим комплексом «Динамика-3» с частотой дискретизации 64 кГц, разработанным совместно специалистами ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина» и СГУПС. Используемые системы и комплексы зарегистрированы в государственном реестре средств измерений под номерами 18892-05 и 66938-17 и имели действующие свидетельства о поверке.

В процессе регистрации данных АЭ системой возникает временная задержка между регистрациями сигналов, затрачиваемая на первичную обработку данных и пропорциональная их объему. В ходе работы установлено, что оптимальная длительность записи сигнала с частотой дискретизации 2 МГц, при которой не искажается поток и обеспечивается возможность корректного определения времени его регистрации, составляет 512 мкс (пат. RU 2704146 от 24.10.2019).

При динамическом воздействии на стеклянные образцы с видимым дефектом после удара фиксируется «резкий» рост количества локализованных сигналов АЭ и постепенное их уменьшение с течением времени. Весь поток с несколькими ударами описывается «ступенчатой» функцией (рисунок 6). В начале каждой «ступени» регистрируется сигнал ударного воздействия. Вертикальная грань «ступени» состоит из дискретных сигналов АЭ, вызванных смещением кромок трещины, которые возникают только при ударе по образцу с трещиной и не связаны с видимым увеличением ее длины. После этого наблюдаются сигналы, совпадающие по времени с видимым увеличением длины трещины, которые на графиках зависимости числа сигналов от времени приводят к «размытию» горизонтальной грани «ступени».

Зависимость относительных деформаций в области берегов трещины от времени удовлетворительно описывается логарифмической функцией (рисунок 7). На участке релаксации напряжения зависимость относительных деформаций от логарифма времени удовлетворительно описывается линейной функцией с коэффициентом корреляции 0,98. Момент удара характеризуется резким увеличением относительных деформации до 50 млн^{-1} с последующими колебаниями на частоте 1,6 кГц и монотонно убывающей амплитудой колебаний в течение 4 мс.

В результате воздействия стального бойка на стеклянный образец с трещиной смещение ее кромок происходит по схеме продольного сдвига. Затухание упругих колебаний зависит от свойств демпфирующего слоя под образцом и изменяется в зависимости от силы прижатия. После затухания колебаний наблюдается релаксация остаточных после удара деформаций, монотонно убывающих во времени (см. рисунок 7). Кромки трещины, возвращаясь в первоначальное состояние, разрушаются, что обнаруживается по сигналам дискретной АЭ.

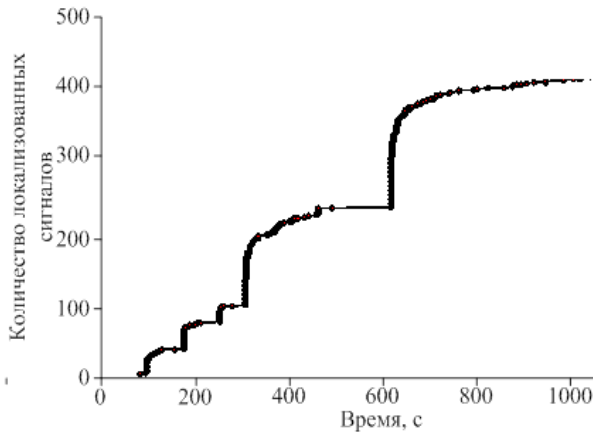


Рисунок 6 – Суммарный счет АЭ для стеклянного образца с трещиной

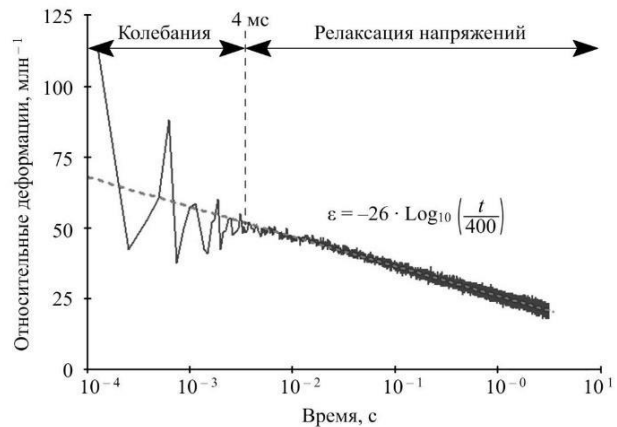


Рисунок 7 – Зависимость относительных деформаций от логарифма времени

Зависимость относительных деформаций от времени (рисунок 8, а) описывается логарифмической функцией вида:

$$\varepsilon = -a \cdot \lg\left(\frac{t}{\tau}\right), \quad (3)$$

где коэффициенты $a = 26 \text{ млн}^{-1}$ и $\tau = 150 \text{ с}$ определялись по результатам экспериментальных исследований методом наименьших квадратов. Во всех проводимых экспериментах достоверность аппроксимации зависимостью (3) контролировалась коэффициентом корреляции, квадрат которого составлял более 0,998. Графики зависимости относительных деформаций от времени для четырех ударов (см. рисунок 8, б) построены в полулогарифмическом масштабе и демонстрируют сходимость на временной оси при $\tau = 150 \text{ с}$.

На графике зависимости числа сигналов АЭ от времени (рисунок 9), построенном в полулогарифмическом масштабе, наблюдаются две области. Сигналы непрерывной АЭ – «хвосты» – монотонно затухающие колебания, вызванные ударным воздействием. Эти сигналы наблюдаются в течение 30 мс после удара, после чего регистрируются дискретные сигналы АЭ материала. Время отсчитывается от вызванного ударом сигнала, не представленного на графике. Зависимость числа зарегистрированных сигналов дискретной АЭ от

времени также, как и деформаций, аппроксимируется логарифмической зависимостью с коэффициентом корреляции 0,94. Отличие коэффициента корреляции от 0,99 объясняется наличием излома зависимости (см. рисунок 9) на интервале времени 0,2...0,4 с.

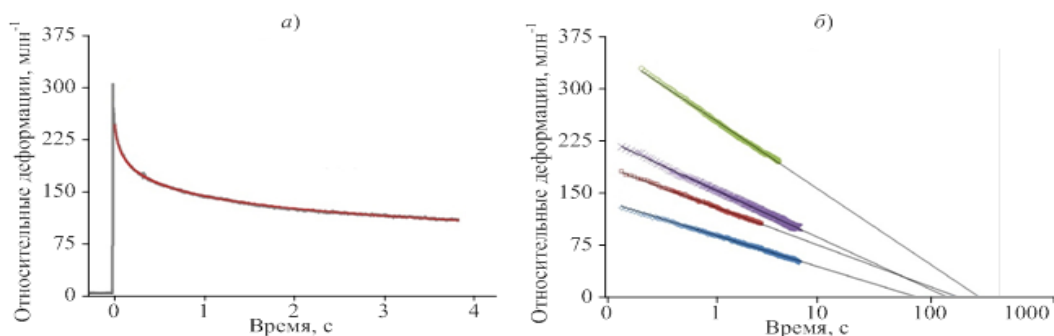


Рисунок 8 – Графики зависимости относительных деформаций стеклянного образца от времени для первого (а) и последующих ударов (б) стальным бойком

Логарифмический характер зависимости относительных деформаций от времени может быть обоснован на основе формулы А. В. Журкова в рамках кинетической теории прочности. Релаксация деформаций сопровождается последовательным разрушением неровностей на соприкасающихся поверхностях трещины. Возникающая при этом АЭ описывается микромеханической моделью, для которой число сигналов АЭ пропорционально количеству разрушившихся структурных элементов материала – неровностей кромок трещины. Зависимость числа сигналов от относительных деформаций (рисунок 10) удовлетворительно описывается линейной функцией с абсолютным значением коэффициента корреляции $R = 0,98$. Видимые отклонения экспериментальных данных от аппроксимирующей прямой свидетельствуют о нарушении стационарности потока сигналов АЭ.

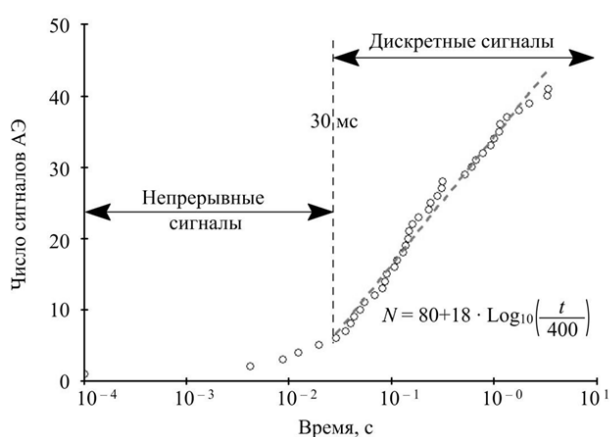


Рисунок 9 – Зависимость количества сигналов АЭ, вызванных ударом, от логарифма времени и результат аппроксимации

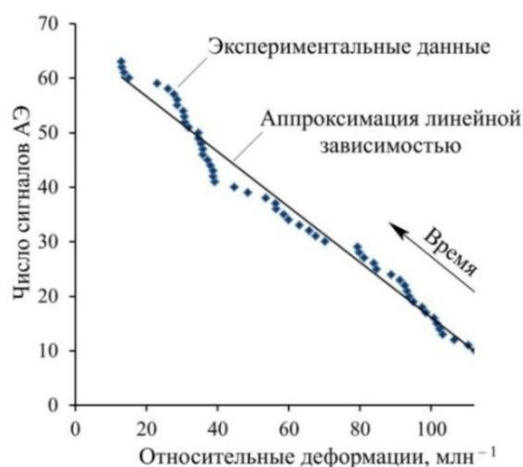


Рисунок 10 – График зависимости количества локализованных сигналов АЭ от относительных деформаций

В потоке АЭ обнаруживаются группы сигналов, интервал времени между которыми превышает среднее значение интервалов между сигналами в группе. Для идентификации групп сигналов разработан алгоритм анализа интервалов времени между сигналами (рисунок 11) на основе коэффициентов отношения длительности временных интервалов K_B и K_E :

$$K_B = n \cdot \frac{t_m - t_{m-1}}{t_{m+n} - t_m}, \quad (4)$$

$$K_E = n \cdot \frac{t_{m+1} - t_m}{t_m - t_{m-n}}, \quad (5)$$

где t_m – время регистрации m -го сигнала АЭ, n – количество исследуемых сигналов.

Коэффициенты (4) и (5) являются индикаторами начала и окончания группы при превышении критического значения, которое рассчитывается по формуле $K_{кр} = n \left(\sqrt[n]{\frac{1}{q}} - 1 \right)$ в рамках модели экспоненциального распределения временных интервалов между сигналами в группе с уровнем значимости q .

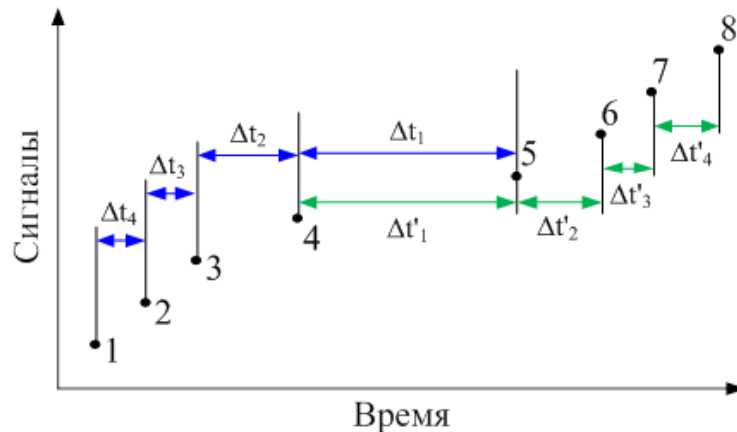


Рисунок 11 – Схема определения отношения временных интервалов

Временная селекция сигналов АЭ, полученных при экспериментах с использованием ударного нагружения стеклянного объекта, позволяет выделить три механизма формирования АЭ. Первый механизм – упругие монотонно затухающие колебания, которые вызваны воздействием бойка на образец и регистрируются в течение 0,025 с от момента воздействия.

Второй механизм связан с разрушением кромок концентраторов напряжений и трещин вследствие ударного воздействия. Сигналы этой группы регистрировались в процессе возвращения кромок трещины в исходное состояние (рисунок 12) на интервале времени 0,025...0,35 с. Третий механизм – замедленное разрушение, при котором сигналы АЭ регистрируются через 0,35 с после удара и в течение более 400 с. Поток сигналов характеризуется

нестационарностью потока событий АЭ и логарифмической зависимостью их суммарного счета от времени. Сигналы формируют различимые по времени группы, внутри которых распределение времени между сигналами описывается экспоненциальным законом распределения.

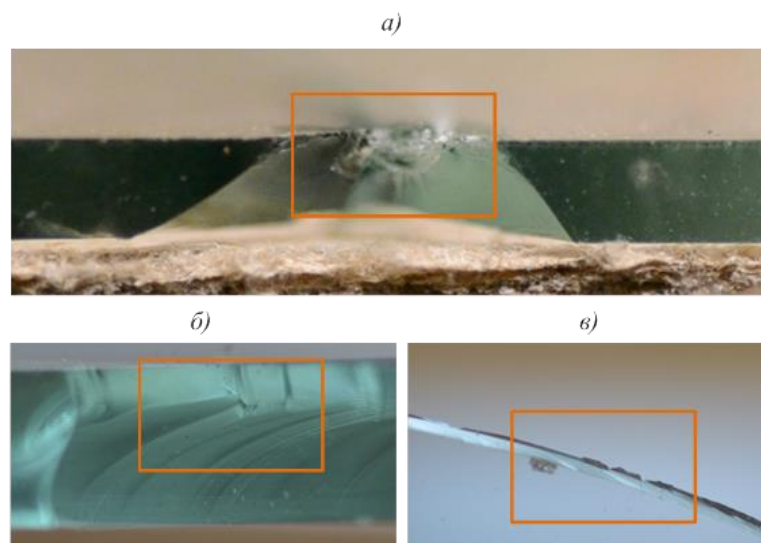


Рисунок 12 – Фотографии смещения кромок трещины от ударного воздействия (а) и повреждения на кромках трещины (б, в)

В четвертой главе представлены алгоритмы проведения контроля методом АЭ при ударном (динамическом) нагружении, которое, в отличие от статического нагружения, не вызывает быстрого развития дефекта и неконтролируемого разрушения при достижении критических нагрузок. Разработан способ АЭ контроля (пат. RU 2676219 от 26.12.2018) объектов с использованием ударного нагружения, который был опробован при контроле стеклянных листов и сосудов давления.

Проводился АЭ контроль технологических трубопроводов опасного производственного объекта ООО «Томскнефтехим», в ходе которого обнаруживались пропуски испытательной среды через фланцевые соединения и прокладки штока запорной арматуры (рисунок 13). В большинстве случаев дефекты не представляли серьезной опасности и устранялись в процессе контроля без сброса давления. Для определения координат источников сигналов использовался зонный метод локации с последующим уточняющим контролем всей зоны. Применение разработанных алгоритмов фазовой локации источников АЭ (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2017610809 от 18.01.2017 г.) позволило повысить точность локации и вдвое сократить время дополнительного контроля другими методами неразрушающего контроля для идентификации дефекта и определения степени его опасности.



Рисунок 13 – Фотографии типичных дефектов, обнаруженных при проведении контроля: пропуск в прокладке штока запорной арматуры (а) и во фланцевом соединении (б)

При проведении контроля методом АЭ элементов конструкции из материалов, склонных к хрупкому разрушению, с дефектами в виде трещин регистрируются сигналы АЭ разной природы, например, рост трещины, трение и разрушение кромок трещины, шумовые составляющие от источника нагружения. В ходе проведения экспериментальных исследований наблюдалось разделение общего потока сигналов АЭ на группы, отличающиеся характерными временными интервалами между сигналами. Для идентификации групп сигналов был разработан алгоритм (рисунок 14), основанный на предположении об экспоненциальном характере распределения временных интервалов в пределах обособленной группы.

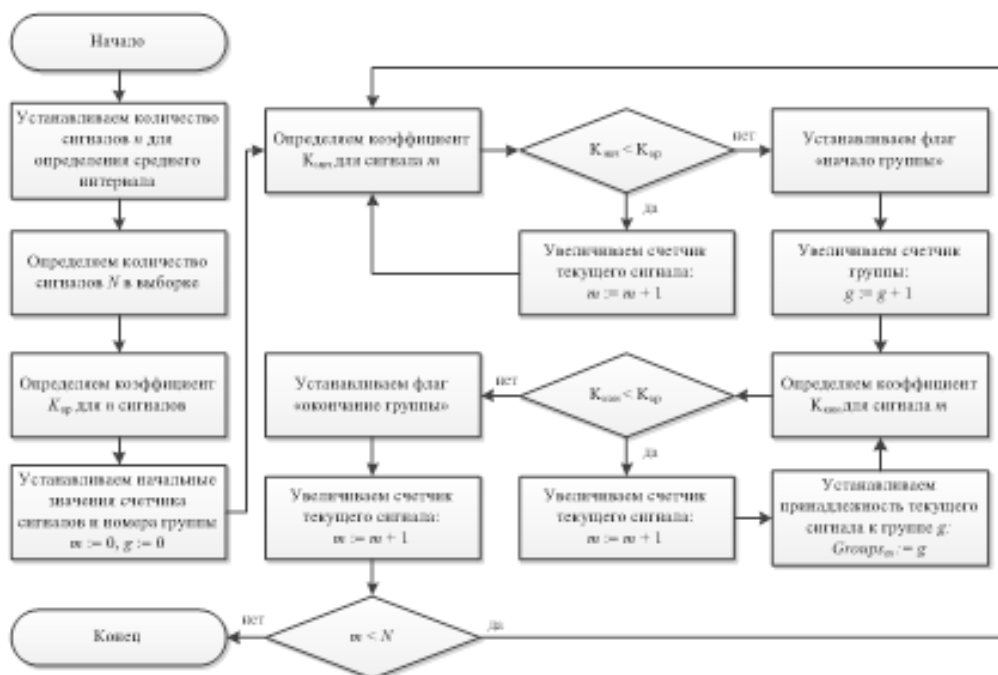


Рисунок 14 – Алгоритм идентификации обособленных групп в потоке сигналов АЭ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационной работы установлены закономерности, на основе которых разработаны способы обработки потока сигналов АЭ и созданы алгоритмы и программное обеспечение комплекса АЭ, реализующие способы обработки, применение которых для объектов контроля со сложной топологией обеспечивает обнаружение хрупко развивающихся дефектов в процессе ударного нагружения.

Основные результаты и выводы:

1) Экспериментально установлены закономерности АЭ при ударном нагружении образцов. Определено, что в процессе ударного воздействия поперечный сдвиг кромок трещин может достигать 0,03 мм, после чего в течение времени порядка $t = 130$ с наблюдается релаксация напряжений и возвращение к равновесному состоянию. Установлено, что зависимость деформаций и суммарного счета АЭ от времени описывается логарифмической функцией вида $\varepsilon = -a \cdot \lg\left(\frac{t}{\tau}\right)$, где коэффициенты $a = 26$ млн⁻¹ и $\tau = 150$ с определены экспериментально. Разработан способ (пат. RU 2676219 от 26.12.2018) проведения контроля объектов методом АЭ и динамической тензометрии с использованием ударного нагружения.

2) На основе модели параметров сигналов АЭ со случайными аддитивными и мультипликативным составляющими неопределенности аналитически доказано и проверено экспериментально, что коэффициент корреляции параметра сигнала с параметром источника равен 1 тогда и только тогда, когда коэффициент корреляции параметров сигналов, зарегистрированных разными ПАЭ, равен 1. На основе полученных закономерностей предложены алгоритмы оценки устойчивости параметров к влиянию мешающих факторов, направленные на оптимизацию комплекса информативных параметров сигналов. В ходе экспериментальных исследований установлено, что наибольшая устойчивость к влиянию мешающих факторов наблюдается у энергетического параметра MARSE, для которого коэффициент шумовой составляющей α не превышает 0,05. Разработан способ АЭ-контроля конструкций (Пат. RU2727316С1 от 21.07.2020 г.), реализующий кластеризацию источников АЭ на основе анализа пространственной корреляции параметров сигналов, зарегистрированных разными ПАЭ, адаптирующийся под свойства объекта контроля и обеспечивающий в исследованных случаях количество информативных сигналов в 1,5 раза больше по сравнению с кластеризацией по координатам источников.

3) Разработан алгоритм фазовой локации источников АЭ и программное обеспечение для локации источников в объектах с развитыми трещинами, нарушающими топологию распространения сигналов АЭ в объекте, что приводит к невозможности использования методов локации, основанных на разности времен прихода сигналов на ПАЭ. Предложена методика фазовой локации источников АЭ, позволяющая определять направления на источник с использованием близкорасположенных в сравнении с длиной волны ПАЭ. По результатам экспериментальных исследований для разработанной модели погрешность определения направления источника составила не более 9°.

4) Разработаны алгоритмы временной кластеризации потока сигналов на независимые группы, характерные для источников АЭ различной природы, основанные на предположении об экспоненциальном распределении интервалов между сигналами и пуассоновском характере потока сигналов. Предложен способ разделения общего потока сигналов на независимые группы по временным интервалам между сигналами, характерным для различных источников АЭ.

Выполненные исследования позволили предложить научно обоснованные технические решения в виде методик и способов контроля методом АЭ элементов конструкций, локации и кластеризации сигналов, что имеет существенное значение для развития теории, методов и могут быть использованы для расширения области применения неразрушающего контроля методом АЭ.

**Список основных работ, опубликованных автором по теме диссертации
Публикации в ведущих научных рецензируемых изданиях, рекомендуемых
ВАК Минобрнауки РФ**

1. Применение пространственной корреляции параметров сигналов акустической эмиссии для решения задач кластеризации источников, *Попков А.А., Бехер С.А.*, Интеллектуальные системы в производстве, 2020. Т. 18, №4, С.30-38.

2. Использование метода акустоупругости для контроля упругих механических напряжений в материале колец подшипников, *Рыжова А.О., Бехер С.А., Попков А.А.*, Дефектоскопия, 2020. №11. С.28-37.

3. Применение ударного нагружения для обнаружения трещин в стекле акустико-эмиссионным методом, *Бехер С.А., Попков А.А.*, Дефектоскопия, 2018. №11. С.3-8.

Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

4. Способ контроля поверхности катания железнодорожных колес в движении, *Бехер С.А., Степанова Л.Н., Коломеец А.О., Попков А.А.*, патент на изобретение RU 2625256 12.07.2017.

5. Способ тестирования и/или опроса удаленных пользователей, *Попков А.А., Бехер С.А.*, патент на изобретение RU 2625554 14.07.2017.

6. Способ определения объема транспортируемого конвейерной лентой сыпучего материала, *Попков А.А., Бехер С.А., Кочетков А.С.*, патент на изобретение RU 2648972 28.03.2018.

7. Способ калибровки преобразователей акустической эмиссии, *Бехер С.А., Сыч Т.В., Попков А.А.*, патент на изобретение RU 2650357 11.04.2018.

8. Способ акустико-эмиссионного контроля конструкций, *Бехер С.А., Попков А.А.*, патент на изобретение RU 2676219 26.12.2018.

9. Способ акустико-эмиссионного контроля сосудов, работающих под давлением, *Бехер С.А., Попков А.А.*, патент на изобретение RU 2704146 24.10.2019.

10. Способ акустико-эмиссионного контроля конструкций, *Бехер С.А., Бобров А.Л., Попков А.А.*, патент на изобретение RU 2727316 21.07.2020.

11. Программа обработки результатов акустико-эмиссионного контроля для фазовой локации источников дискретной акустической эмиссии. Номер регистрации (свидетельства): 2017610809, *Бехер С.А., Попков А.А.*, Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. 2017. № 1.

12. Анализ зависимостей параметров сигналов акустической эмиссии и кластеризации источников. Номер регистрации (свидетельства): 2021611019, *Бехер С.А., Попков А.А.*, Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. 2021. № 1.

Публикации в других научных изданиях

13. Восстановление измеряемых характеристик источников акустической эмиссии при контроле металлоконструкций в машиностроении, *Бобров А.Л., Попков А.А.*, Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2018. Т. 21. №3. С. 31-37.

14. Временные характеристики потока сигналов акустической эмиссии при развитии трещин в стекле при ударном нагружении, *Бехер С.А., Попков А.А.*, Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2019. Т. 22. №1. С. 62-71.

15. Usage autocorrelation function in the capacity of indicator shape of the signal in acoustic emission testing of intricate castings, *Popkov A.*, Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 671 (1). P. 012047.

16. The correlation analysis of informative AE signal parameters, *Popkov A.*, Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 881(1). P. 012032.

17. Use of computer software for technical training at rail car repair shops. *Popkov A., Bekher S.*, МАТЕС Web of Conferences. 2018. V. 216. P. 04001.

18. Dynamic loading in monitoring of brittle objects by acoustic emission method, *Popkov A., Kochetkov A.*, МАТЕС Web of Conferences. 2018. V. 216. P. 03006.

19. Новый подход к определению параметров поля при магнитопорошковом контроле, *Кочетков А.С., Попков А.А.*, В сборнике: ПОЛИТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ. Материалы VIII Международной научно-технической конференции в рамках года науки Россия - ЕС "Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке". 2015. С. 637-639.

20. Применение корреляционных методов анализа акустико-эмиссионных сигналов при контроле литых деталей сложной формы, *Попков А.А.*, В сборнике:

Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность. Сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2015. С. 130-134

21. Использование фазовой локации для определения направления источника акустической эмиссии, **Попков А.А.**, *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2016. № 3. С. 14-20.

22. Оценка достоверности фазовых методов локации источников дискретной акустической эмиссии, **Попков А.А.**, В сборнике: Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций. Сборник материалов. 2016. С. 278-279.

23. Локация источников акустической эмиссии путем определения фазовой разности между преобразователями, **Попков А.А.**, В сборнике: НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ. Сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2016. С. 265-269.

24. Корреляционные методы анализа информативности параметров сигналов акустической эмиссии, **Попков А.А.**, *Бехер С.А.*, В книге: Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке. 2016. С. 195-196.

25. Анализ информативных параметров сигналов акустической эмиссии при калибровке преобразователей с использованием ударного воздействия, *Сыч Т.В.*, *Бехер С.А.*, **Попков А.А.**, В книге: Sibtest 2017: Сборник тезисов IV международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest. 2017. С. 86-88.

26. Исследование информативности параметров сигналов акустической эмиссии при хрупком разрушении материала, **Попков А.А.**, *Бехер С.А.*, В книге: Sibtest 2017: Сборник тезисов IV международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest. 2017. С. 59-60.

27. Корреляционные методы анализа информативности параметров сигналов акустической эмиссии (АЭ), **Попков А.А.**, *Бехер С.А.*, В сборнике: Политранспортные системы. материалы IX Международной научно-технической конференции. Сибирский государственный университет путей сообщения. 2017. С. 440-444.

28. Акустическая эмиссия в хрупких объектах при ударном нагружении, *Бехер С.А.*, **Попков А.А.**, В сборнике: Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (АПМАЭ-2018) сборник материалов. Ответственные редакторы Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов. 2018. С. 47-48.

29. Перспективы комплексного использования акустической эмиссии (АЭ) и тензометрии для контроля динамически нагруженных объектов, *Бехер С.А.*, *Колomeец А.О.*, **Попков А.А.**, В сборнике: Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (АПМАЭ-2018). Ответственные редакторы Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов. 2018. С. 43-44.