

На правах рукописи



СУНГАТУЛЛИН ИСКАНДЕР РАВИЛЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
ОБЪЕКТОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КРИТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С
ТРЕЩИНАМИ**

05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность
(нефтегазовая отрасль)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2022

Работа выполнена на кафедре «Технологические машины и оборудование»
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Кузеев Искандер Рустемович

Официальные оппоненты: **Пермяков Владимир Николаевич**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
университет» / кафедра техносферной безопасности,
профессор

Самигуллин Гафур Халафович
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС
МЧС России» / кафедра пожарной безопасности
технологических процессов и производств, профессор

Ведущая организация Общество с ограниченной ответственностью «Центр
исследований экстремальных ситуаций» (г. Москва)

Защита диссертации состоится «21» июня 2022 года в 10.00 на заседании
диссертационного совета Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан,
г. Уфа, ул. Космонавтов, 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Латыпов Олег Ренатович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

Эксплуатация промышленных объектов повышенной опасности, большинство из которых принадлежат нефтяной и газовой промышленности, регулируются Федеральным законом №116-ФЗ (в редакции от 11.06.2021 г.). Усложнение технических систем приводит к существенным проблемам при обеспечении безопасности. Технический прогресс создает определенные угрозы, а тенденция такова, что разрыв между потенциальной опасностью и возможностью научных исследований, служб государственного надзора возрастает. В Российской Федерации в последние годы количество техногенных катастроф достигает 500 случаев в год, а ущерб от них неуклонно возрастает. Совершенствование средств диагностики привели к пониманию того, что объекты имеют трещины и, несмотря на большие запасы прочности, закладываемые при проектировании, нет гарантии сохранения приемлемых уровней рисков.

В настоящее время накоплен большой научный и практический опыт в обеспечении безопасности сложных технических систем, изложенный в трудах ведущих научных школ Серенсена С.В., Работнова Ю.Н., Болотина В.В., Пригоровского И.И., Фролова К.В., Махутова Н.А. позволил перейти от идеи обеспечения прочности, жесткости, устойчивости к идеологии долговечности, живучести конструкций, к реализации риск-ориентированного подхода к обеспечению безопасности и ее регулирования.

Развитие механики разрушения в трудах А.А. Гриффитса, Дж. Р. Ирвина, Е. Орована, Дж. Тейлора, Н.А. Махутова позволили разработать энергетические, силовые и деформационные критерии, которые дали возможность рассматривать разрушение как процесс, происходящий в пространстве и времени, определить критерии оценки критических размеров трещин. В монографиях Шаньявского А.А., Морозова Е.М., Зайнуллина Р.С. изложены основы безопасного разрушения объектов с трещинами, базирующиеся на уравнениях Коффина-Мэнсона, Пэриса, Басквина. Прогресс в этом направлении был достигнут благодаря отходу от идеи изотропности и сплошности конструкционных материалов к идее иерархичности структуры,

изложенной в трудах Панина В.Е., Ивановой В.С. и др. Возможность прогнозирования работы конструкций с трещинами в нефтегазовой отрасли обеспечили многочисленные исследования реальных объектов изложенные в трудах Махутова Н.А., Москвичева В.В., Лисанова М.В., Печеркина А.С., Морозова Е.М., Зорина Е.Е., Лисина Ю.В., Ларионова В.И., Сущева С.П., Сызранцева В.Н., Голофаства С.Л., Пермьякова В.Н., Гумерова А.Г., Самигуллина Г.Х. и др.

Постоянно изменяющиеся внешние условия при эксплуатации объектов нефтегазовой отрасли могут существенно изменить напряжения в конструкциях, привести к накоплению энергии упругой деформации. Это в свою очередь приведет к накоплению повреждений, изменению механических характеристик сталей и, как результат, изменению критические размеры трещин и перевести их в разряд развивающихся. В связи с этим при обнаружении трещин и принятии решения дальнейшей эксплуатации объекта, предлагается заполнить полость трещин композиционным материалом (КМ) в жидкой фазе, сформировать твердый КМ и закрепить берега трещины (Кузеев И.Р., Гафарова В.А.). При этом представляется разумным отслеживание целостности композиционного материала одним из методов неразрушающего контроля. Наиболее эффективным для этого является метод акустической эмиссии (АЭ), поскольку развивающийся дефект и разрушающийся КМ генерируют акустические волны. Такая возможность показана в трудах Иванова В.И., Башкова О.В., Барат В.А., Мерсона Д.Л., Вильдемана В.Э. и др.

Разработка новых технологий по улучшению свойств изоляционных материалов, например из поливинилхлорида (ПВХ), с помощью воздействия электромагнитным излучением сверх высоких частот (СВЧ-излучение) (Абуталипова Е.М., Авренюк А.Н.) требует определения влияния излучения на композиционный материал при совмещении технологий защиты объектов с трещинами.

В связи с изложенным является актуальным разработать методику оценки степени безопасности эксплуатации объектов с трещинами, учитывающую изменение механических параметров конструкционных и композиционных материалов и связанных с ними акустических параметров.

Степень разработанности темы исследований

Несмотря на то, что аварии случаются во всех промышленно развитых странах, подход к обеспечению безопасности техносферы различается. Российская наука в этом направлении имеет фундаментальные результаты, которые отразились в уникальном многотомном труде «Безопасность России». Удалось создать научно-методическое обоснование неприемлемых и допустимых рисков, которые представлены в трудах Махутова Н.А., Романова А.Н., Лисанова М.В., Гаденина М.М., Москвичева В.В., Пермякова В.Н., Печеркина А.С., Ларионова В.И., Зайнуллина Р.С., Лепихина А.М., Кузеева И.Р. и многих других участников научного коллектива. Отмечается, что реализация опасности может происходить в самом объекте, объект может находиться в зоне действия опасности и не иметь необходимого уровня защищенности. Такое положение может приводить к большому числу вариаций в реализации аварий. В нефтегазовой отрасли практически все однотипные конструкции имеют индивидуальные особенности, которые размывают статистический подход к определению математического ожидания вероятности события. Многие исследователи Зорин Е.Е., Голофаст С.Л., Неганов Д.А., Сызранцев В.Н. отмечают большой разброс значений механических характеристик однотипных сталей, что затрудняет прогнозирование ресурса опасных объектов. Это особенно важно с точки зрения работы конструкций с трещинами. Несмотря на то, что трещины можно контролировать на предмет их изменения во времени методами дефектоскопии, надежность конструкции увеличивается, если закрепить их берега композиционным материалом, формируемым непосредственно в полости. При этом за целостностью композиционного материала можно следить методами акустической эмиссии, однако отсутствуют сведения о характере акустических сигналов, которые возникают при разрушении материалов на основе эпоксидных смол. Этими обстоятельствами формируется цель и задачи исследования.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание исследований соответствуют паспорту специальности 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность (нефтегазовая отрасль), а именно пункту 13 «Разработка методов оценки и прогнозирования ресурса безопасной

эксплуатации технических устройств сложных технических систем опасных производственных объектов».

Цель работы – обеспечение безопасности и защищенности работы опасных производственных объектов нефтегазовых технологий с использованием композиционных материалов для заделки трещин и контроль за их целостностью КМ методами акустической эмиссии.

Задачи диссертационной работы

1 Выполнить аналитический обзор литературы для выявления основных направлений исследований по снижению рисков при эксплуатации опасных производственных объектов.

2 Определить характерные особенности генерирования акустических сигналов при совместном деформировании стали, композиционного материала и изоляционной пленки из ПВХ.

3 Оценить влияние СВЧ-излучения, используемого для улучшения качества изоляции объектов из ПВХ пленки, на прочностные характеристики композиционного материала, сформированного в трещинах.

4 Разработать алгоритм оценки защищенности и предельно допустимых состояний прочности, долговечности и живучести при эксплуатации опасных производственных объектов с трещинами.

Научная новизна

1 Разработан комплексный критерий на основе закона суммирования повреждений Пальмгрена - Майнера, учитывающий особенности реализации прочности (σ_i/σ_c), долговечности (N_i/N_c) и живучести (I_i/I_c) опасного производственного объекта, позволяющий оценить степень опасности функционирования конструкции с трещиной, в том числе заполненной композиционным материалом.

2 Показано, что при деформировании объекта с трещиной, заполненной гибридным композиционным материалом на эпоксидной основе, формируются акустические сигналы с амплитудой в интервале 50-90 дБ при его разрушении. При этом суммарный выброс АЭ сигналов интенсифицируется в момент разрушения КМ.

Поскольку амплитуда акустических сигналов при разрушении стали реализуется в интервале до 50 дБ, значение амплитуды сигналов характерных для КМ является диагностическим признаком для принятия решения о выводе объекта из эксплуатации.

3 Показано, что при использовании СВЧ технологии для повышения эксплуатационных свойств защитной ПВХ пленки при ее нанесении в качестве изоляционного материала, не снижают механических свойств КМ, находящегося в полости трещины, в случае использования в качестве наполнителя нано размерные частицы оксида железа.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании защищенности опасных производственных объектов при их эксплуатации с трещинами, заполненными композиционным материалом и отслеживании его целостности средствами регистрации сигналов акустической эмиссии.

Результаты исследований, легли в основу алгоритма обеспечения прочности, долговечности и живучести опасных производственных объектов с трещинами докритической длины за счет заполнения полости трещины композиционным материалом и контроля его целостности методами акустической эмиссии и используются в ООО НИПИ «ПЕГАЗ» при разработке проектов реконструкции технологических объектов нефтегазовых технологий.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты применяются в учебном процессе ФГБОУ ВО «УГНТУ» при чтении лекций по дисциплинам «Физические основы природы разрушения конструкционных материалов» и «Оборудование и методы для проведения испытания материалов» для подготовки студентов по направлению 15.03.02 «Технологические машины и оборудование».

Методология и методы исследования

Методология исследования основана на комплексном обеспечении безопасности объектов нефтегазовой отрасли с трещинами за счет обоснования критериев прочности, долговечности и живучести конструкции при использовании

КМ, сформированных в полости трещины. При этом используется знание о характерных диапазонах изменения амплитуды АЭ сигналов при разрушении КМ, что позволяет предотвратить разрушение конструкции в целом.

Теоретическое и экспериментальное решение задач осуществлено при помощи стандартных методик, методов статистической обработки данных, современных программных комплексов численного моделирования методом конечных элементов. Эксперименты проводили с использованием физических полей акустических волн, генерируемых в исследуемых материалах при деформировании, электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне, генерируемых внешним источником.

Положения, выносимые на защиту:

1 Алгоритм прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации оболочковых конструкций с учетом показателей ее прочности, долговечности и живучести.

2 Результаты комплексных исследований характера генерирования акустических волн при совместном деформировании стальных образцов, композиционного материала и изоляционной ПВХ пленки.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью разработанной математической модели, её адекватностью, использованием известных положений инженерных наук, сходимостью полученных результатов экспериментов с практическими данными.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Фундаментальные и прикладные исследования в технических науках в условиях перехода предприятий на импортозамещение: проблемы и пути решения» (Уфа, 2015), VI Russian business forum on cost engineering (Москва, 2017), 71-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (Уфа, 2020), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Экспертиза промышленной безопасности и техническое диагностирование на опасных производственных объектах» (Уфа, 2020), XV Международной научно-

практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники - 2022» (Уфа, 2022).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 9 научных трудах, в том числе 4 статьях в ведущих рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 1 статье в международной базе цитирования Scopus.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованной литературы, включающего 164 наименования. Работа изложена на 114 страницах машинописного текста, содержит 67 рисунков, 11 таблиц.

Автор выражает благодарность научному консультанту кандидату технических наук Гафаровой Виктории Александровне за помощь в проведении исследований.

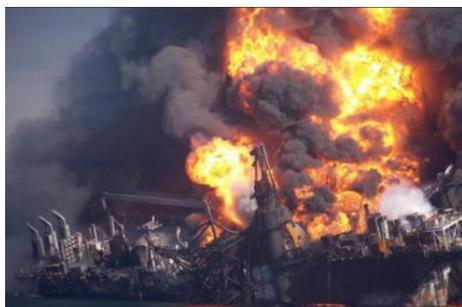
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и основные задачи, обозначены основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая ценность результатов работы.

Первая глава посвящена рассмотрению трех аспектов, характеризующих закономерности возникновения нештатных и катастрофических ситуаций при эксплуатации опасных объектов техногенной сферы: проектные ошибки, человеческий фактор, отказ средств контроля. В этом схожесть всех топовых мировых катастроф, приведших в результате реализации к существенному загрязнению, окружающей среды и человеческим жертвам.

На Рисунке 1 показаны фрагменты масштабных катастроф, произошедших в нефтегазовой отрасли. К основным причинам этих явлений относится халатность и низкая квалификация персонала, намеренное снижение затрат на обеспечение безопасной эксплуатации, непредсказуемость природных процессов. Расследования всех топовых мировых катастроф таких как Чернобыльская АЭС, АЭС Фукусима,

Саяно-Шушенская ГЭС, нефтяная платформа в Мексиканском заливе, разрушения на химическом заводе в индийском городе Бхопал также указывают на ошибки персонала на всех этапах жизненного цикла объектов.



а)



б)



в)



г)

- а) разрушение нефтяной платформы в Мексиканском заливе;
- б) разрушение нефтепровода в пустыне Арава (Израиль);
- в) разрушение газопровода в РФ; г) аварийное разрушение резервуара

Рисунок 1 – Наиболее резонансные техногенные катастрофы
в нефтегазовой отрасли

Рассматривается принцип, по которому в мировой практике относительно опасных производственных объектов реализуют обеспечение безопасности. В России, США и промышленно развитых странах Европы вопросы промышленной безопасности решаются в рамках государственно-частного партнерства (ГЧП). В России преобладает государственный компонент, а в других развитых странах частный. Экспертиза безопасности, как конкретное заключение по объекту, выполняется негосударственными предприятиями, получившими лицензию на этот вид деятельности. При этом в России реализуется обязательная регистрация Ростехнадзором. В США основой системы является обеспечение безопасности

наемных работников, поэтому вопросы промышленной безопасности относятся к компетенции Управления охраны труда Министерства труда.

В России развивается подход, по которому определяются допустимые уровни рисков для различных категорий опасных техногенных объектов. Тем не менее в нашей стране стабильно фиксируется 350-500 техногенных катастроф, а общий ущерб от них возрастает.

Поскольку катастрофы являются многофакторными событиями предполагается выстраивать диаграммы предельных поверхностей недопустимых и допустимых рисков, которые вычисляются по вероятностям событий и ущербов. Такой подход позволяет учитывать эту многофакторность и является перспективным направлением. Однако отсутствие фактической серийности в нефтегазовом оборудовании и отличие в рабочих параметрах и внешних условиях, требует индивидуального подхода к обеспечению необходимого уровня их безопасности. Основанный на расчете различных уровней рисков метод обеспечения безопасности не позволяет гарантировать внезапного преодоления зоны приемлемых рисков.

Поэтому более целесообразным представляется строить методы оценки опасности объектов на основе анализа прочности, долговечности и живучести конструкций. Тем более, что свойства конструкционных материалов различаются даже для одной и той же марки стали, не говоря о том, что в процессе накопления повреждений свойства также меняются.

Является весьма перспективным использование композиционных материалов для заполнения полости трещин и закрепления их берегов. Показано, что применение этого метода позволяет увеличить кратно критический размер трещин. Рекомендуется использовать гибридные композиционные материалы, в которых наполнители имеют различный масштаб размеров. Композиционный материал может иметь и второе назначение, связанное с возможностью отслеживания его состояния, например, средствами регистрации акустической эмиссии, как это происходит при использовании тензочувствительных покрытий.

Во второй главе представлены сведения об объектах и методах исследования. Для достижения цели исследования потребовалось изготовление нестандартных образцов из стали 09Г2С: гладких и с трещиноподобными дефектами, из

композиционных материалов с различными наполнителями и из изоляционной ПВХ-пленки.

Выявление характерных особенностей генерирующихся при разрушении композитов акустических сигналов, проводили на специальных образцах, которые отливались в формах и выдерживались в них до полного затвердевания (Рисунок 2, а). Для снятия показаний акустических сигналов в процессе испытания использовали плоские образцы нестандартной конфигурации с трещиноподобными дефектами и без дефектные с расширениями для размещения датчиков (Рисунок 2, б).

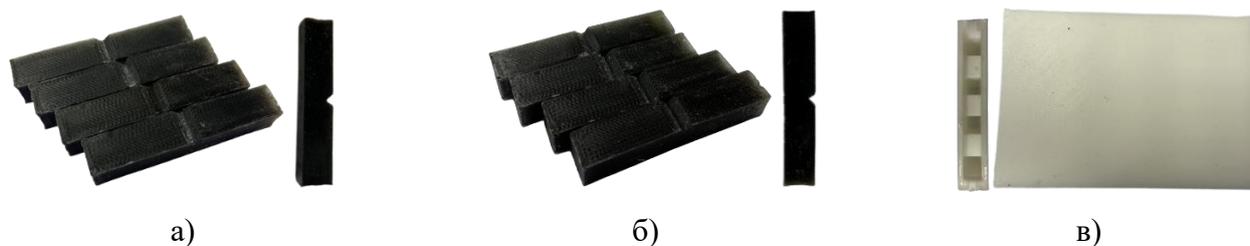


а) форма для изготовления образцов из композиционного материала и образцы для измерения механических и акустических характеристик;

б) Образцы для изучения акустических сигналов

Рисунок 2 – Объект исследования

Для анализа влияния СВЧ-излучения на композиционный материал изготавливали образцы для определения ударной вязкости (Рисунок 3 а, б). Образцы отливались в силиконовой форме, изготовление которой происходило в два этапа. На первом этапе моделировали конструкцию, распечатывали ее на 3D принтере. На втором этапе, производили «заливку» силиконовой жидкости в форму (Рисунке 3 в), на третьем этапе после полного отверждения образцов из композита, производили облучение в СВЧ-диапазоне в течение 1 минуты при трех режимах мощности излучения: 400 Вт; 560 Вт; 800 Вт.



а) КМ с наполнителем в виде магнитных частиц оксида железа микронного размера и нано размера; б) КМ с наполнителем в виде магнитных частиц оксида железа микронного размера; в) форма для изготовления образцов для определения ударной вязкости

Рисунок 3 – Образцы из композиционного материала с концентратором вида V для определения ударной вязкости

Механические свойства материалов определяли на динамометре ИР 5113-100-11 и на сервогидравлической испытательной системе Instron 8801.

Ударную вязкость определяли на универсальном электродинамическом стенде-копре CEAST 9340 фирмы Instron. Испытания проводили: в режиме Шарпи V40, T ($^{\circ}\text{C}$) = 23, Impact energy (J) = 40.000, Impact velocity (m/s) = 4.150, Impact height (m) = 0.878, Instrument Type – INST_DT 40.

Одним из важных свойств композиционного материала является твердость, которая оценивается как правило по методу Роквелла. Для этого нами использовался твердомер Wilson Hardness 574T (Instron).

Для изучения акустических сигналов, сгенерированных при деформировании и разрушения образцов из стали, композитов, пленки и комбинированных образцов использовали прибор «Малахит АС -15А». Акустическая система «Малахит АС-15А» имеет в своем составе 12 измерительных каналов, в каждом из которых можно измерить такие параметры как время прихода импульса АЭ, амплитуду пика сигнала, время формирования пика и его максимальное значение, время удержания пика, длительность акустического импульса, превышения пороговых значений, ряд энергетических параметров. Прибор достаточно точный, поскольку предел

допускаемой абсолютной погрешности измерения амплитуды не превышает 2 дБ при измерении на среднегеометрической частоте рабочего диапазона частот.

Третья глава посвящена изучению закономерностей возникновения акустических сигналов в образцах с композитами в трещинах в силовом поле и изменения механических характеристик в СВЧ-поле.

На первом этапе исследований определяли характер проявления распространения акустических волн при деформировании и разрушении стальных образцов. Снятие показаний по измеряемым параметрам связано с особенностями методики проведения эксперимента.

Возникает задача контроля целостности композиционного материала в полости трещины, который был внедрен в обнаруженную трещину в момент ремонта, межремонтный период.

Композиционный материал может обеспечивать прочность объекта с трещиной, однако необходимо учитывать, что прочностные свойства композиционного материала существенно ниже, чем стали. Поэтому для удержания трещины от развития при возникновении нештатных ситуаций важно обеспечить баланс между когезионной прочностью композита и его адгезией к металлической поверхности. Как при разрушении самого композита, так и разрушении адгезионного контакта возникают акустические шумы, которые можно уловить с помощью приборов для регистрации акустической эмиссии.

При рассмотрении особенностей разрушения образцов, можно заметить, что при минимальной для данных экспериментов ширине трещиноподобного дефекта, композит сохраняет адгезионную связь и локально разрушается при растяжении. При этом разрушающая образец трещина образовывалась в том месте, где композит терял адгезионный контакт с металлом.

Процесс развития трещин носит скачкообразный характер. Каждый скачок соответствует преодолению некоторого барьера с выделением упругой энергии. Вследствие этого формируется импульс АЭ, который, в свою очередь, отображает процесс разрушения объекта. Рост трещин в конструкциях, как правило, контролируют по следующим параметрам АЭ: числу импульсов, числу выбросов

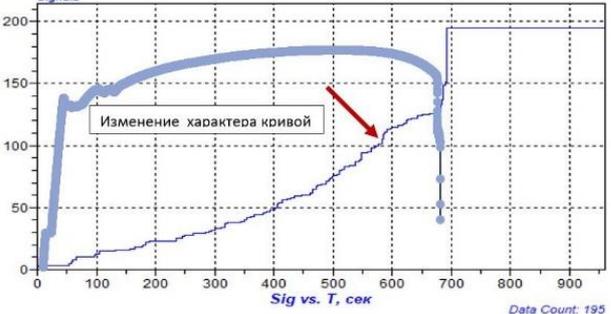
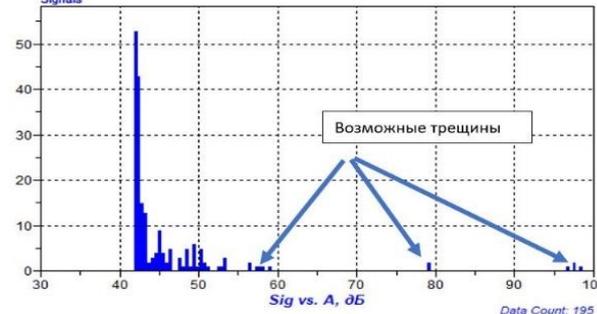
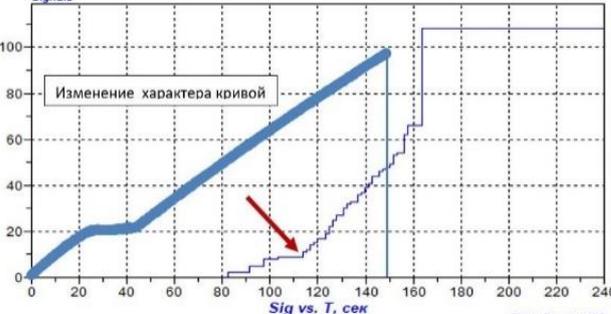
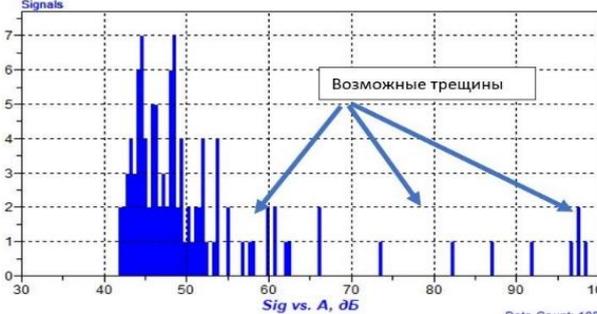
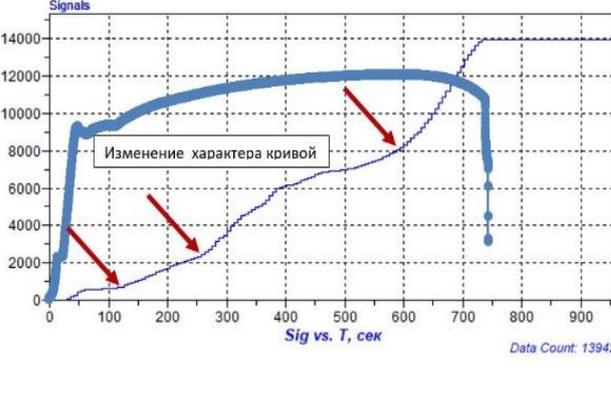
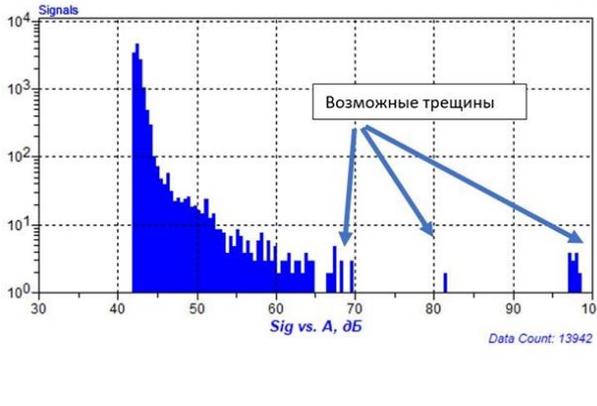
сигнала АЭ через порог, активности (скорости счета), амплитуде импульсов (амплитудному распределению), эффективному значению АЭ процесса, координатам источников АЭ. Качественный визуальный анализ кривых показывает, что наиболее информативным и наглядным параметром при анализе процесса разрушения объекта является зависимость общего числа импульсов АЭ (либо суммарного счета) от нагрузки.

При возникновении и распространении магистральных трещин на фоне «низкоамплитудной» АЭ регистрируются импульсы с амплитудами более чем на порядок выше. С процессами пластической деформации в зонах концентрации напряжений, в том числе в вершине трещин, следует связывать низкоамплитудную АЭ, а с процессами распространения трещин, которые проявляются в виде микроразрывов и сопровождаются появлением новых поверхностей трещин, высокоамплитудную АЭ, как это показано в Таблице 1.

На третьем этапе исследований была поставлена цель установить, как формируются акустические сигналы в случае, когда в системе деформируются одновременно металл, композиционный материал и изоляция. Особенности эмиссии акустических сигналов изучали в следующей последовательности: образцы композиционного материала, образцы из полихлорвиниловой пленки, и в завершении испытывались стальные образцы с трещиноподобным дефектом, заполненным КМ и покрытые пленкой. Часть этих исследований показаны в Таблице 1.

Показанные на Рисунке 4 распределение сигналов АЭ хорошо согласуется с литературными данными. КМ формирует сигналы с амплитудой в интервале 50-90 дБ, пленка ПВХ 100 и более дБ. На Рисунке 4, в показано как генерирование сигналов происходит во всех трех материалах одновременно: амплитуды 90-100дБ – ПВХ, 50-80 дБ – КМ, 40-50 дБ – металл. Суммарный счет АЭ сигналов также хорошо интерпретируются. Генерирование сигналов КМ происходит интенсивно в момент разрушения (Рисунок 5, а), а пленка практически не генерирует сигналы.

Таблица 1 – Зависимость суммарного числа сигналов N (sig) от времени T и распределение числа сигналов N (Sig)A по амплитуде A образца

Тип образца	Зависимость суммарного числа сигналов N (sig) от времени T	Распределение числа сигналов N (Sig)A по амплитуде A образца
Металлический образец с дефектом		
Образец из КМ		
Металлический образец с дефектом, заполненный КМ		

В таких образцах пленка оставалась целой. При разрушении комплексного образца в основном количество сигналов генерируется деформируемым стальным образцом.

Данные, представленные на Рисунках 4 и 5 показывают, что распределение амплитуд сигналов и их суммарный счет могут использоваться в диагностических целях.

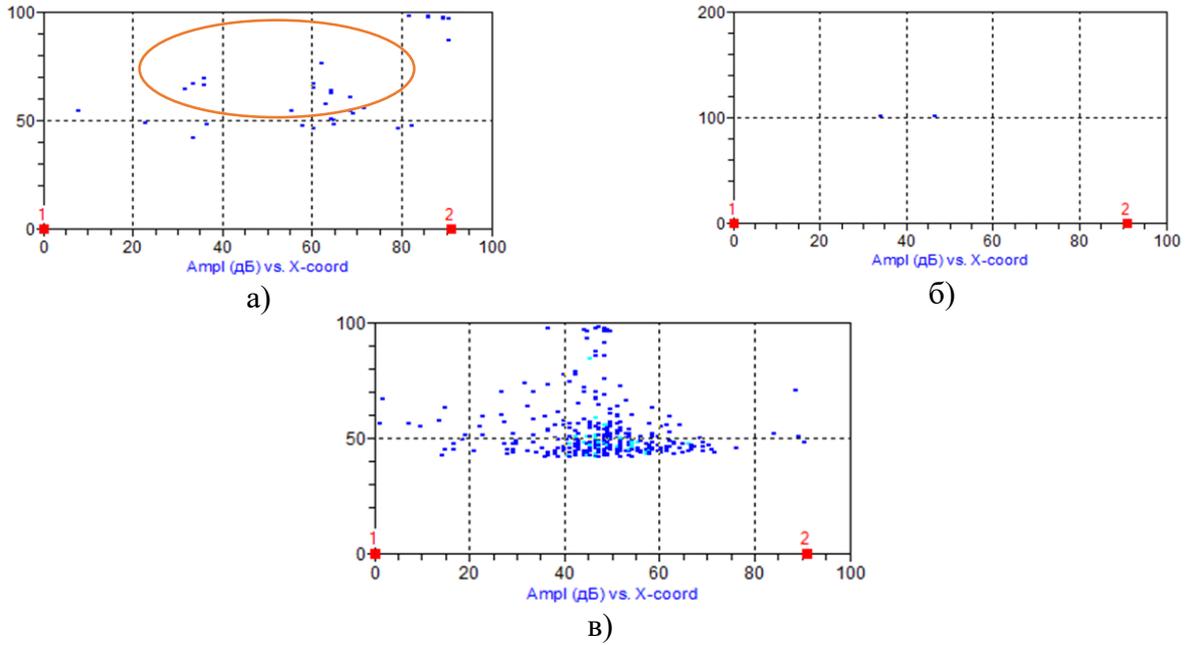


Рисунок 4 – Распределение амплитуды сигналов АЭ между датчиками

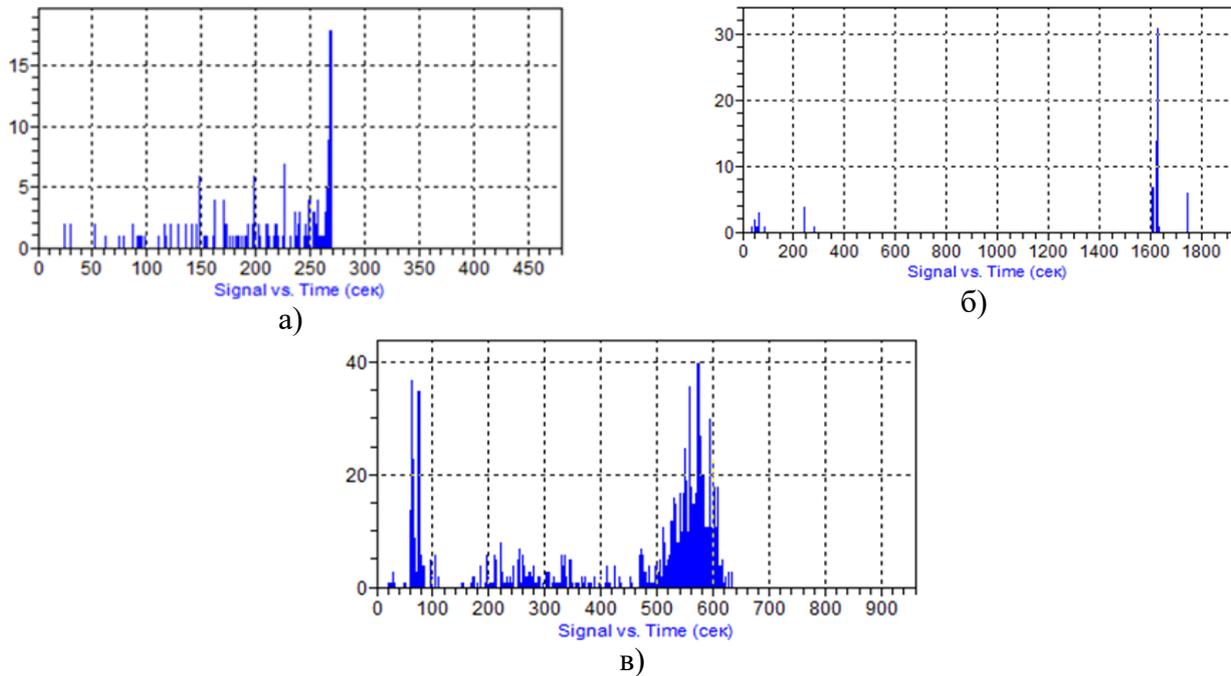


Рисунок 5 – Суммарный счет сигналов АЭ

При использовании прогрессивной технологии нанесения ремонтного изоляционного покрытия из ПВХ, обработанного в поле СВЧ-излучения, необходимо изучить влияние излучения на композиционный материал. В качестве показателя, по которому оценивалось влияние СВЧ-излучения, была выбрана ударная вязкость образцов. Ударная вязкость материала комплексно характеризует как прочностные свойства, так и их трещиностойкость.

При воздействии излучения с минимальной мощностью ударная вязкость композиционного материала с наночастицами уменьшается на 10% по сравнению с необработанным материалом. В отсутствие нанокomпонентов снижение становится ощутимым и достигает 27%.

Такая же тенденция наблюдается при увеличении мощности излучения до 560 Вт. При максимальных для эксперимента значениях мощности излучения ударная вязкость композиционного материала без наночастиц уменьшается, достигая значения 2,88, обозначая экстремум (Рисунок 6).

В экспериментах было отмечено, что температура образцов при СВЧ-обработке в зависимости от мощности излучения изменялась неодинаково для однокомпонентного и гибридного КМ. Для однокомпонентного КМ температура разогрева изменилась от 28 °С при мощности обработки 400 Вт до 37 °С при 800 Вт. В гибридном КМ температура изменилась с 48 °С при минимальной мощности до 75 °С при максимальной. Этот эффект может повлиять на релаксацию некоторых внутренних напряжений в объеме, возникших при фазовом превращении. На это указывает незначительное изменение твердости на поверхности образцов из гибридного КМ (Рисунок 7).

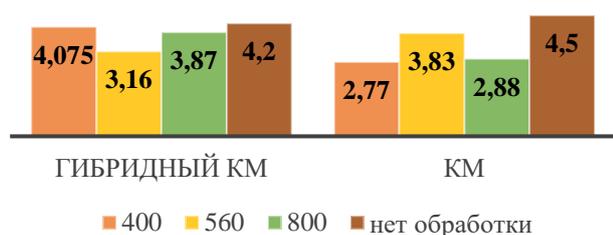


Рисунок 6 – Ударная вязкость (кДж/м²)

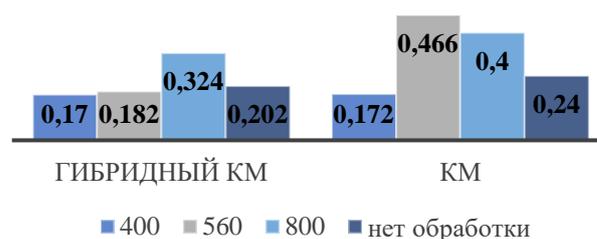


Рисунок 7 – Твердость, HR15T

Четвертая глава посвящена разработке алгоритма обеспечения безопасного функционирования опасного объекта с трещиной. Опыт эксплуатации опасных производственных объектов в нефтегазовой отрасли показывает, что существует три основных механизма снижения ресурса: потеря прочности и устойчивости формы, накопление усталостных повреждений и подрост трещины до критического размера. Эти три механизма могут реализовываться параллельно и определенным образом влиять на суммарный эффект снижения ресурса. В таком случае эффективным является метод построения пространственных трехмерных поверхностей допустимых и предельных состояний. Для упрощения решения задачи пространственные поверхности заменить плоскими поверхностями и использовать линейный закон суммирования повреждений Пальмгрена – Майнера:

$$\sum_{i=1}^3 (a_i/a_c) \leq 1, \quad (1)$$

где a_i и a_c – текущее и критическое значение параметров.

Для рассматриваемого случая (1) будет иметь вид:

$$\sigma_n / \sigma_c + N_i / N_c + l_i / l_c \leq 1, \quad (2)$$

где σ_n и σ_c – текущее и критическое значение напряжений соответственно;

N_i и N_c – текущее и критическое значение количество циклов;

l_i и l_c - текущее и критическое значение длины трещины.

При использовании третьей теории прочности, уравнения Лэнджера для определения числа циклов до разрушения, критерии линейной механики разрушения, уравнение (2) будет иметь вид:

$$PD/2s \sigma_c + N_i / [0,25 \ln(1/1-\Psi)/\epsilon_a - (0,4\sigma_c/E)]^{1/m} + l_i / 0,32 (K_{lc} / \sigma_c)^2 \leq 1, \quad (3)$$

где P – внутреннее давление, МПа;

D – внутренний диаметр, м;

s – толщина оболочки, м,

Ψ – относительное сужение;

ε_a – амплитуда деформаций;

σ_b – предел прочности, МПа;

E – модуль упругости материала, МПа;

m – константа материала.

Удобство использования уравнения Пальмгрена-Майнера заключается в том, что в пространстве состояний объекта оно отображает плоскость в отрезках (Рисунок 8). Все состояния, заключенные между тремя осями и плоскостью, являются допустимыми. Критическое состояние идентифицируется тогда, когда обобщающий вектор выходит за пределы плоскости.

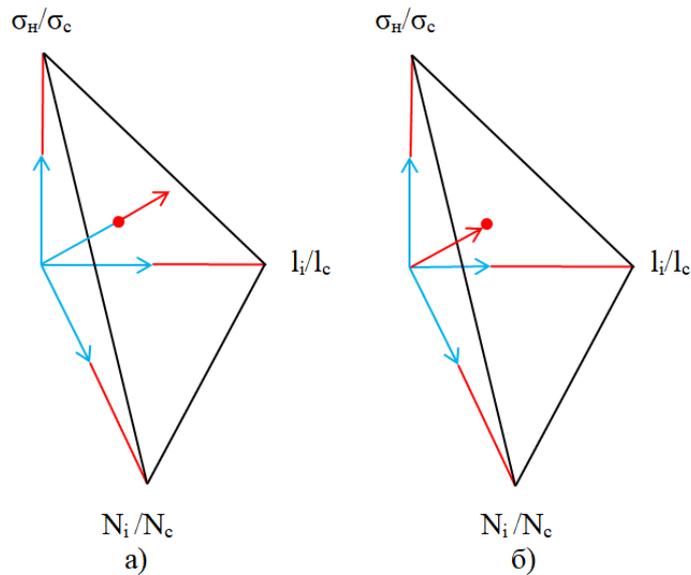


Рисунок 8 – Диаграмма критических состояний объекта до (а) и после (б) заделки трещины композитом

Важно обеспечить живучесть конструкций, поскольку в мировой практике, как упоминалось выше, допускается возможность их эксплуатации при наличии трещин. В ряде стран, в том числе России, используются нормативные документы, регламентирующие такое положение. Тройные диаграммы демонстрируют

возможность реализации критической ситуации, когда отдельно все критерии меньше единицы.

Уравнения типа (3) могут прогнозировать поведение индивидуального опасного объекта. И не только прогнозировать, но и регулировать. Покажем это на примере конструкции, которая имеет трещину. В диссертационной работе Гафаровой В.А. показано, что закрепление берегов трещины композитным материалом может увеличить K_{Ic} в два раза. Это указывает на возможность уменьшения третьего слагаемого уравнения (3). Метод вакуумирования полости трещин позволяет заполнить ее жидкой фазой с последующим переходом в твердую фазу и адгезионным взаимодействием с поверхностью трещины. Изменение K_{Ic} позволяет трансформировать диаграмму на Рисунке 8.

Алгоритм обеспечения безопасности объектов с трещинами включает моделирование объекта, встраивание в модель трещины, обнаруженной в процессе диагностирования. Для раскрытия алгоритма проведено моделирование реального резервуара с обнаруженной трещиной в программном комплексе ABAQUS CAE. При визуальном-измерительном контроле и дефектоскопии на стенке резервуара обнаружена меридиональная трещина в районе сварного шва между первым и вторым поясами. Трещина имела размер 15 мм в длину и глубину 10 мм на первом поясе и 6 мм на втором. Раскрытие берегов трещины 1 мм. При достижении критической длины трещины размер ее растет быстро, со скоростью, не подлежащей контролю. В связи с этим предлагается заполнить полость трещины композиционным материалом и установить датчики АЭ. Композиционный материал будет реализовывать две функции: сдерживание берегов трещины и снижения концентрации напряжений в вершине трещины, а также генерировать сигналы АЭ при разрушении в определенной области амплитуд (Рисунок 4, а). Появление в спектре сигналов АЭ амплитудой больше 50 дБ будет означать разрушение композиционного материала и необходимость проведения дефектоскопии или принятия решения о проведении ремонта.

Разработан алгоритм оценки состояния объекта с трещиной в процессе эксплуатации (Рисунок 9).

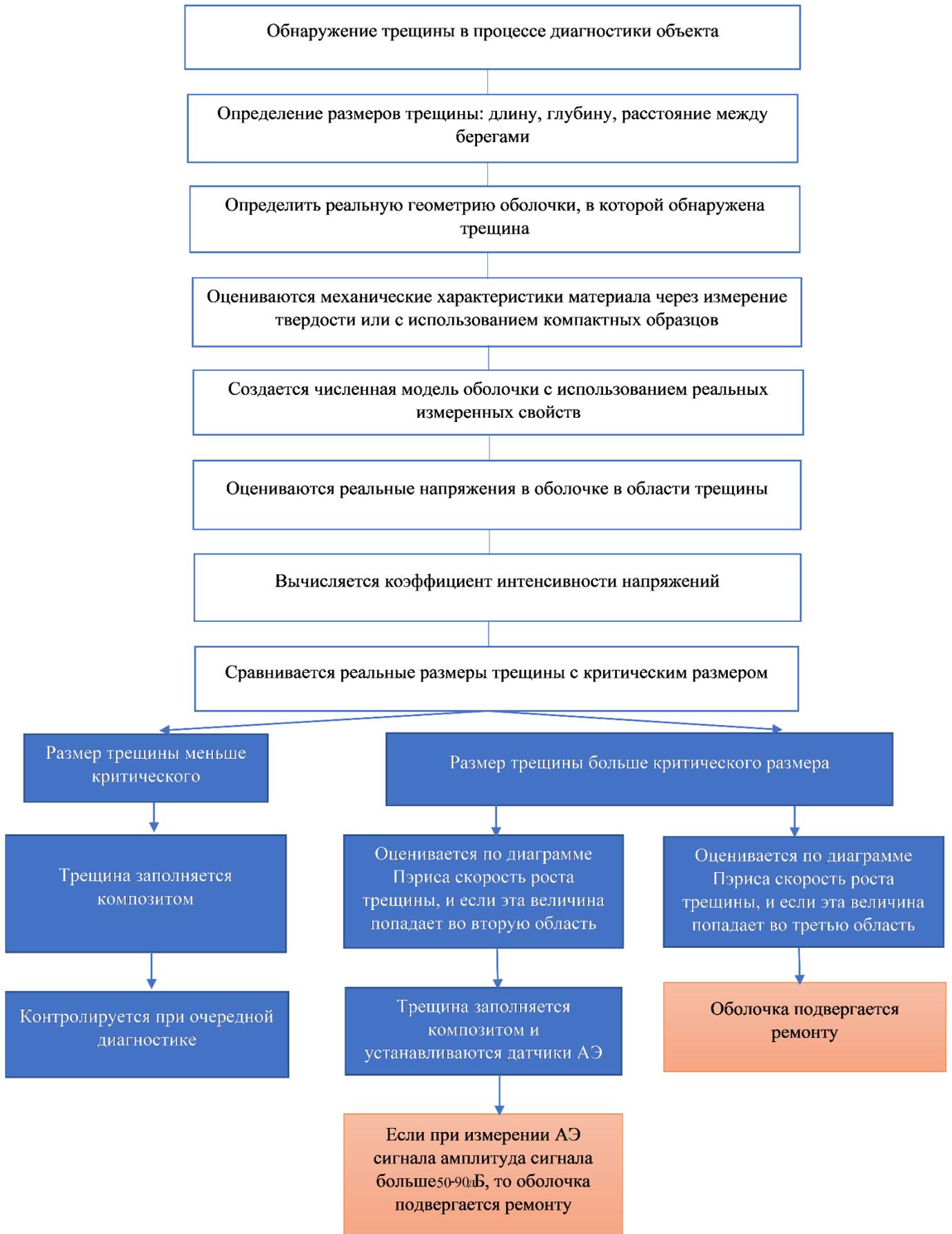


Рисунок 9 – Алгоритм диагностирования объекта с трещиной

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Разработан алгоритм обеспечения безопасной эксплуатации объектов нефтегазовых технологий с использованием гибридных композиционных материалов, формирующихся в полости трещины и акустико-эмиссионного контроля за целостностью композиционного материала по параметру уровня амплитуды генерируемого сигнала.

2 На основании уравнения суммирования повреждений Пальмгрена – Майнера предложен комплексный критерий для оценки критического состояния опасного производственного объекта, который позволяет использовать объемные диаграммы, основанные на учете особенностей реализации прочности, долговечности и живучести.

3 Показано, что при деформировании и разрушении гибридного композиционного материала на эпоксидной основе с наполнителями разного масштабного уровня по схеме одноосного растяжения формируются акустические сигналы с амплитудой в интервале 50-90 дБ, суммарный выброс АЭ сигналов также интенсифицируется в момент разрушения КМ и указанные параметры служат диагностическим признаком наступления предельного состояния и требует принятия решения о выводе объекта из эксплуатации.

4 Показано, что в упругой области деформирования композиционный материал не генерирует АЭ сигналы, что указывает на его достаточную прочность для удерживания берегов трещины. Поскольку при проектировании объекта обеспечивается его работа в упругой области деформирования, применение КМ формирующегося в полости трещины, уменьшает вероятность внезапного разрушения.

5 Показано, что при использовании СВЧ-технологии для повышения эксплуатационных свойств защитной ПВХ пленки при ее нанесении, не снижаются механические свойства КМ, находящегося в полости трещины, в случае использования в качестве наполнителя нано размерные частицы оксида железа.

Основные результаты работы опубликованы в 9 научных трудах:**Ведущие рецензируемые научные журналы и издания, входящие в перечень ВАК**

1 Сунгатуллин, И.Р. Обеспечение безопасности эксплуатации протяженных опасных производственных объектов / И.Р. Сунгатуллин, В.А. Гафарова, И.Р. Кузеев // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2021. – №2. – С. 15-27.

2 Сунгатуллин, И.Р. Индивидуальные техногенные риски / И.Р. Сунгатуллин, В.А. Гафарова, Д.Х. Махмутов, И.Р. Кузеев // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2021. – №2. – С. 28-47.

3 Абуталипова, Е.М. Влияние энергии СВЧ-излучения на эволюцию структуры полимерных материалов / Е.М. Абуталипова, Д.Е. Бугай, Т.А. Хакимов, С.В. Смольников, И.Р. Сунгатуллин, Е.В. Попова // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 4 (102). – С. 151-162.

4 Попова, Е.В. Информационная база контроля состояния пожарной безопасности на объектах газодобычи / Е.В. Попова, Е.М. Абуталипова, Т.А. Хакимов, С.В. Смольников, И.Р. Сунгатуллин, И.Ф. Хафизов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 4 (102). – С. 199-208.

Материалы, опубликованные в прочих изданиях

1 Abutalipova, E.M. Investigation of the effect of microwave-radiation energy flux on the structure and properties of polymeric insulating materials / E.M. Abutalipova, D.E. Bugai, A.N. Avrenyuk, O.B. Strel'tsov, I.R. Sungatullin // Chemical and petroleum engineering. – Т. 52. – Vol.3. – pp 212-216.

2 Азаматова, К.И. Влияние СВЧ-излучения на композиционные материалы на основе эпоксидных смол / К.И. Азаматова, М.В. Чевардина, И.Р. Сунгатуллин, В.А. Гафарова // XV Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники - 2022». – Уфа: УГНТУ. – Т. 2. С. 232-233.

3 Сунгатуллин, И.Р. Обеспечение контроля безопасности функционирования объектов с трещинами методом акустической эмиссии / И.Р. Сунгатуллин, В.А. Гафарова, Д.Х. Махмутов, И.Р. Кузеев // Печатный журнал «Нефтегазовое дело». – 2021. – Т. 19. – № 2. – С. 91-96.

4 Гафарова, В.А. Алгоритм применения компактных образцов для определения механических характеристик конструкционного материала при расследовании аварии / В.А. Гафарова, Р.Н. Хасанов, И.Р. Сунгатуллин // 71-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. – Уфа: УГНТУ. – 2020. – С. 252-253.

5 Попова, Е.В. Классификация взрывопожароопасных объектов газового промысла / Е.В. Попова, Е.М. Абуталипова, И.Р. Сунгатуллин, И.Ф. Хафизов // Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Фундаментальные и прикладные исследования в технических науках в условиях перехода предприятий на импортозамещение: проблемы и пути решения». – Уфа: УГНТУ. – 2015. – С. 382-384.