

На правах рукописи

Первейталов Олег Геннадьевич



**ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СОСУДОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ
СЖИЖЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ
ИСПЫТАНИЙ**

***Специальность 2.8.5. Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ***

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Носов Виктор Владимирович

Официальные оппоненты:

Мерсон Дмитрий Львович

доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет», Научно-исследовательский институт прогрессивных технологий, директор;

Леонович Игорь Александрович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, кафедра сооружения и ремонта газонефтепроводов и хранилищ, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа.

Защита диссертации состоится **24 сентября 2025 г. в 10:00** на заседании диссертационного совета ГУ.11 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан **24 июля 2025 г.**

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



ДВОЙНИКОВ

Михаил Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Количество объектов, используемых для хранения сжиженных углеводородных газов, неуклонно растет ввиду развития СПГ отрасли РФ. Значительная доля объектов хранения углеводородов работает в условиях существенно ограниченного ресурса. Для продления безопасного срока эксплуатации и дальнейшей работы требуется диагностирование состояния и выявление в них опасных дефектов. Такое диагностирование при требованиях физической и практической обоснованности возможно только на самом объекте в рамках периодических гидравлических и пневматических испытаний, а также при остановке оборудования.

Существующие методы неразрушающего контроля недостаточно эффективны для выявления опасных дефектов в объектах низкотемпературного хранения газов, так как данные объекты зачастую выходят из строя до появления признаков, сигнализирующих об их предразрушающем состоянии, или же продолжают нормальную эксплуатацию при наличии критических сигналов поврежденности. Это связано с разрушением наиболее поврежденных локальных областей сосудов, которые ограничивают усталостный ресурс и проявляют при этом непредсказуемость долговечности. Кроме того, существенное влияние на процесс разрушения оказывают такие особенности эксплуатации низкотемпературных емкостей, как динамические нагрузки в условиях пониженных температур, низкотемпературное и деформационное охрупчивание материала объектов, нестационарность процесса нагружения и невозможность проведения разрушающих испытаний.

Одним из наиболее эффективных методов неразрушающего контроля для полевой оценки поврежденности сосудов хранения сжиженных углеводородных газов является метод акустической эмиссии (АЭ). Особенности метода АЭ и теоретическая основа информационно-кинетического подхода (кинетическая концепция прочности, микромеханика разрушения, многоуровневая модель потока импульсов, принцип однородного разрушения и акустически активного объема) позволяют получать информацию об интенсивности деградиационных процессов в ходе периодических испытаний, то есть

в условиях, наиболее приближенных к эксплуатационным. Это не позволяют сделать другие методы неразрушающего контроля и подходы к акустико-эмиссионному диагностированию, такие как статистический, кинетический или механический.

Это связано с тем, что сигналы, регистрируемые методами прохождения и отражения вводимых извне волн различных физических полей, неоднозначно связаны с процессом накопления повреждений. Активные методы неразрушающего контроля, такие как ультразвуковой и радиационный контроль, фиксирует искажения генерируемых излучений при прохождении через дефектные области. Поток сигналов в данных методах не является физически однородным с процессом накопления повреждений и не несет информацию о развивающихся дефектных областях. Долговечность сосудов определяется на субмикроскопическом масштабном уровне в ходе длительного этапа накопления микротрещин, имеющего индивидуальную интенсивность деградиационных процессов в каждом отдельном случае.

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных связи метода АЭ с развитием микродефектов, модели, которая бы предлагала оценку уникального характера разрушения, свойственного конкретному технологическому объекту без проведения разрушающих испытаний и расчет остаточного срока эксплуатации с учетом низкотемпературных условий эксплуатации сосудов, пока нет. Разброс структурных характеристик материала, его напряженного состояния и особенности периодического диагностирования сосудов для хранения сжиженных углеводородных газов делает актуальной разработку новых информативных методов контроля их структурной целостности, снижающих неопределенность оценки усталостного ресурса.

Степень разработанности темы исследования

Развитие способов оценки долговечности конструкционных материалов с помощью метода АЭ связано с научными трудами таких авторов, как Ботвина Л.Р., Махмудов Х.В., Махутов Н.А., Петерсен Т.Б., Лексовский А.М., Дробот Ю.В., Кутень М.М., Козинкина А.И., Тютин М.Р., Степанова Л.Н.

Развитие положений, связанных с физической природой метода АЭ и способами обработки потока сигналов АЭ, получило в трудах Мерсона Д.В., Растегаева И.А., Барата В.А., Буйло С.И., Веттерня В.И., Иванова В.И., Куксенко В.С., Нефедьева Е.Ю.

Положения кинетической концепции прочности, которая является одной из важнейших теоретических составляющих данной диссертации, развиты в работах Журкова С.Н., Регеля В.Р., Слуцкера А.И., Петрова В.А. В международном научном сообществе можно выделить исследования таких ученых, как Tetelman A.S., Palmer I.G., Sinclair A.C.E., Pollock A.A., Scruby C.B. Clark G., Chou H.Y.

Однако в работах данных авторов не уделено достаточно внимания оценке усталостной долговечности сосудов для хранения сжиженных углеводородных газов в условиях низких температур в ходе периодических испытаний. Решение данной проблемы предлагается вести на основе анализа результатов акустико-эмиссионного контроля с позиции многоуровневой модели временной зависимости при диагностическом нагружении сварных соединений. Работа является продолжением направления, защищенного ранее в диссертациях Носова В.В., Буракова И.Н., Ельчанинова Г.С., Лаврина В.Г., Лаховой Е.Н., Зеленского Н.А., Григорьева Е.В.

Объектом исследования являются сосуды для хранения сжиженных углеводородных газов в условиях низких температур.

Предмет исследования – деградационные процессы в сосудах для хранения сжиженных углеводородных газов в условиях низких температур.

Цель работы – обоснование метода оценки остаточной усталостной долговечности низкотемпературных сосудов, основанного на использовании информативных параметров потока сигналов акустической эмиссии, полученных в ходе плановых испытаний.

Идея работы – для достижения поставленной цели при оценке остаточного усталостного ресурса необходимо использовать положения кинетической концепции прочности и многоуровневой модели потока сигналов акустической эмиссии.

Задачи исследования:

1. Разработать и обосновать дополнение к информационно-кинетическому подходу, которое позволяло бы рассчитывать число

циклов перепада давления в низкотемпературных сосудах в условиях вязко-хрупкого перехода на основе временной зависимости акустико-эмиссионных сигналов.

2. Разработать методологию экспериментальных исследований, направленных на обоснование способа оценки усталостной долговечности в условиях малоциклового низкотемпературного нагружения и различных скоростей нагружения сталей сосудов сжиженных углеводородных газов.

3. Провести экспериментальное исследование связи концентрационно-кинетических показателей, полученных в ходе акустико-эмиссионного диагностирования, с усталостной долговечностью на различных уровнях напряжений и после различной степени усталостной наработки, а также со скоростью деформирования в условиях охрупчивания.

4. Проанализировать результаты экспериментальных исследований и оценить достоверность модели.

5. Разработать методику по применению способа оценки усталостной долговечности в условиях нерегулярного нагружения криогенных емкостей, структурной неоднородности и неоднородности напряженного состояния.

Научная новизна:

1. Установлена зависимость между концентрационно-кинетическими акустико-эмиссионными показателями, полученными в ходе однократных плановых испытаний и структурным параметром уравнения долговечности, которая используется для оценки усталостной долговечности сосудов для хранения сжиженных углеводородных газов.

2. Установлена зависимость между концентрационно-кинетическими акустико-эмиссионными показателями, полученными в ходе однократных испытаний с различной скоростью деформации и степенью низкотемпературного и деформационного охрупчивания материала сосудов для хранения сжиженных углеводородных газов, а также предложен способ оценки температуры вязко-хрупкого перехода материала.

Соответствие паспорту научной специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности

2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ по пункту 4: «Методы и средства информационных технологий, моделирования, мониторинга, прогнозирования, интеллектуального инжиниринга и управления, автоматизации и роботизации, стандартизации и цифровизации технологических процессов проектирования, сооружения, эксплуатации, диагностики, ремонта сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, а также других газовых, жидкостных и многофазных сред, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта с целью повышения эффективности, надежности и безопасности использования отраслевого потенциала и ресурса трубопроводных конструкций».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработан способ оценки усталостной долговечности реального низкотемпературного сосуда, исходными параметрами для которого являются полученные в ходе периодических испытаний значения угла наклона линейного участка на временной зависимости логарифма суммарного счета акустической эмиссии.

2. Обоснована взаимосвязь амплитудных значений напряжений цикла нагружения и величины предварительной усталостной наработки объекта с акустико-эмиссионными концентрационно-кинетическими параметрами интенсивности микроповреждения.

3. Обоснована взаимосвязь деформационного охрупчивания и охрупчивания в ходе повышения скорости деформирования с акустико-эмиссионными концентрационно-кинетическими параметрами интенсивности микроповреждения.

4. Разработана методика и практические рекомендации по использованию акустико-эмиссионного диагностирования в ходе периодических испытаний сосудов и расчету усталостного ресурса при нерегулярном эксплуатационном нагружении реальных низкотемпературных сосудов.

5. Разработанные в рамках кандидатской диссертации методики были внедрены на базе компании ООО «АктивТестГруп» (акт о внедрении результатов диссертации от 24.03.2025 г.).

Методология и методы исследования. Решение поставленных в работе задач осуществлялось на основе информационно-кинетического подхода к акустико-эмиссионному диагностированию, базирующегося на положениях кинетической теории прочности и микромеханике разрушения твёрдых тел, путем проведения экспериментальных исследований на низкотемпературную малоцикловую усталость и статическую прочность после различной степени наработки с выявлением процессов разрушения, протекающих в объекте исследования, с применением сертифицированного лабораторного оборудования и с привлечением современных программных продуктов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Использование полученного уравнения термически активированного разрушения и акустико-эмиссионного показателя Y_{AE} , получаемого по результатам регистрации сигналов акустической эмиссии в ходе плановых акустико-эмиссионных испытаний, позволяет определять усталостную долговечность низкотемпературных сосудов для хранения сжиженных углеводородных газов, работающих в условиях циклического нерегулярного нагружения при пониженных температурах.

2. Использование временной зависимости логарифма суммарного счета акустической эмиссии в ходе диагностического нагружения и рассчитываемого акустико-эмиссионного показателя Y_{AE} позволяет оценивать степень низкотемпературного и деформационного охрупчивания в условиях длительной эксплуатации, а также различных скоростей повышения давления.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием стандартных методов математического моделирования, сопоставлением результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также физического компьютерного моделирования, сравнением с результатами, полученными в работах других авторов, результатами статистической обработки экспериментальных исследований, публикацией результатов в рецензируемых научных журналах.

Апробация диссертационного исследования проведена на 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3

международных. За последние 3 года принято участие в 3 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных: Международная конференция «Человек в Арктике» (г. Санкт-Петербург, 18-19 ноября 2021 г.); IV международная научно-техническая конференция молодых ученых «Транспорт и хранение углеводородов» (г. Омск, 21 апреля 2023 г.); X международная научно-техническая конференция «Освоение ресурсов нефти и газа российского шельфа: Арктика и Дальний Восток ОМНР-2024» (г. Санкт-Петербург, 17-18 июня 2024 г.).

Личный вклад автора заключается в постановке и формулировке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы, посвященной диагностированию остаточной долговечности сосуда с помощью метода акустической эмиссии, разработке методики исследования, проведении экспериментальных исследований, включающих акустико-эмиссионные испытания образцов после различной степени усталостной наработки и в условиях вязко-хрупкого перехода, разработке дополнения к информационно-кинетическому подходу, включающего метод оценки усталостной долговечности емкостей для сжиженных углеводородных газов по результатам пневматических испытаний, а также способ учета деформационного и низкотемпературного охрупчивания материала данных объектов.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 304 наименования, и 3 приложений. Диссертация изложена на 223 страницах машинописного текста, содержит 101 рисунок и 16 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю – профессору кафедры метрологии приборостроения и управления качеством Санкт-Петербургского горного университета Императрицы Екатерины II Носову Виктору Владимировичу за оказанную помощь и ценные наставления.

Сотрудникам ООО «Интерюнис-ИТ» – Сергею Владимировичу Елизарову и Вере Александровне Барат, сотруднику Научно-исследовательского института прогрессивных технологий – Игорю Анатольевичу Растегаеву, сотруднику Ижорской НТК – Михаилу Владиславовичу Григорьеву, сотруднику ООО «ГТЛАБ» – Владиславу Владимировичу Виноградову за помощь в организации и обеспечении экспериментов.

Сотруднику ООО «АктивТестГруп» – Илье Олеговичу Котовщикову за помощь с внедрением результатов диссертационного исследования.

Сотрудникам Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II: ассистенту кафедры отраслевой экономики – Цыгляну Павлу Павловичу, ассистенту кафедры транспорта и хранения нефти и газа – Джемилёву Энверу Руслановичу за неоценимую поддержку и помощь в ходе выполнения диссертационного исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ условий эксплуатации сосудов для хранения сжиженных углеводородных газов в условиях низких температур, который показал, что доминирующий вклад в потерю работоспособности таких объектов вносит процесс накопления усталостных повреждений. Обзор экспериментальных данных подтвердил положение, по которому процесс накопления микротрещин до критической плотности занимает большую часть ресурса и является определяющим. Рассмотрено влияние низких температур экс-

платации данных объектов, приводящее к охрупчиванию и сокращающее заключительную стадию разрушения. Рассмотрены физические основы акта АЭ, позволяющие связать время регистрации сигнала с прочностным состоянием дефектной структуры материала, а также наиболее распространенные критерии и подходы, связывающие параметры дефектов с параметрами АЭ.

Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе представлено обоснование разработанной методики экспериментального исследования, позволившей воспроизвести наиболее важные стороны эксплуатации низкотемпературных сосудов в лабораторных условиях, а именно: пульсирующий характер нагружения внутренним давлением, уровни напряжений, соответствующие малоциклового усталости, низкая частота и температура нагружения, а также распространенная сталь СтЗпс. Приведено описание хода эксперимента, используемой АЭ аппаратуры, образцов и испытательных машин.

В третьей главе проведены теоретические исследования, направленные на разработку дополнения к информационно-кинетическому подходу в области расчета усталостного ресурса. Рассмотрены физические закономерности процесса накопления повреждений с точки зрения термофлуктуационной теории прочности и связь интенсивности деградиационных процессов с отдельными этапами на временной зависимости суммарных параметров АЭ. Приведен анализ результатов эксперимента.

В четвертой главе представлены теоретические исследования, посвященные вкладу низкотемпературного и деформационного охрупчивания сталей сосудов в термически активированный механизм разрушения, и анализ результатов экспериментальных АЭ испытаний в условиях вязко-хрупкого перехода. Подтверждено, что прогностические параметры Y_{AE} и X_{AE} являются чувствительными к процессу охрупчивания в условиях однородного микротрещинообразования.

В пятой главе приведено описание и примеры использования разработанной методики по оценке числа перепадов давления в низ-

котемпературном сосуде до разрушения по результатам периодических АЭ испытаний в условиях нестационарного режима изменения давления.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационного исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Использование полученного уравнения термически активированного разрушения и акустико-эмиссионного показателя Y_{AE} , получаемого по результатам регистрации сигналов акустической эмиссии в ходе плановых акустико-эмиссионных испытаний, позволяет определять усталостную долговечность низкотемпературных сосудов для хранения сжиженных углеводородных газов, работающих в условиях циклического нерегулярного нагружения при пониженных температурах.

Выявление интенсивности накопления концентрации микроповреждений в ходе разрушения структурных элементов на этапе однородного разрушения при статическом нагружении позволит установить число перепадов давления в емкости до достижения критической концентрации повреждений.

Накопление микротрещин описывается зависимостью (1):

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{C_0 - C(t)}{\tau(t)} \quad (1)$$

где C_0 – максимальное возможное значение концентрации микротрещин для данного образца, м^{-3} ; $C(t)$ – концентрация микронесплошностей в момент времени t , м^{-3} ; τ – время ожидания термофлуктуационного образования микротрещины, сек, которое описывается традиционным уравнением термофлуктуационной теории прочности (2):

$$\tau = \tau_0 \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \sigma(t)}{kT} \right] \quad (2)$$

где τ_0 – величина порядка дебаевского периода атомных колебаний, сек; U_0 – энергия активации разрушения, соответствующая энергии сублимации (отрыву атома и переходу тела в газообразное состояние), Дж; γ – параметр структурного состояния, который соответ-

стствует значению активационного объема и отражает структурную неоднородность материала образца (порядка $10 \div 10^3$ атомных объемов), м^3 ; $\sigma(t)$ – функция изменения напряжения во времени на одном структурном элементе, МПа; k – постоянная Больцмана, Дж/К; T – температура, К.

С учетом разброса значений прочностного параметра $\omega = \gamma\sigma/kT$ и метрологической составляющей контроля временная зависимость одного из кумулятивных параметров АЭ в ходе статического нагружения описывается многоуровневой моделью АЭ (3):

$$N_{AE}(t) = \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} \Psi(\omega) \left[1 - \exp \left[- \int_0^t \frac{d\bar{t}}{\theta(U_0, \omega(\bar{t}))} \right] \right] d\omega \quad (3)$$

где $\Psi(\omega)$ – функция плотности распределения параметра ω ; $\Delta\omega$ – доверительный интервал разброса значений прочностного параметра; k_{AE} – акустико-эмиссионный коэффициент.

Вид функции $\Psi(\omega)$ зависит от напряжений и структурной неоднородности образца. Временная зависимость числа импульсов АЭ как частного случая параметра $\xi(t)$ на этапе однородного разрушения, когда сохраняется относительное постоянство параметра γ в соответствии с моделью (3) выражается через уравнение (4):

$$N_{\Sigma \text{однородн.}}(t) = \frac{k_{AE} C_0 K T \exp \left[\frac{\gamma \dot{\sigma} t - U_0}{KT} \right]}{\gamma \dot{\sigma} \tau_0} \quad (4)$$

После простых математических преобразований можно получить в наиболее простом виде концентрационно-кинетический параметр (5):

$$Y_{AE} = \frac{d \ln N_{AE}(t)}{d\sigma} = \frac{\gamma}{KT} = \frac{X_{AE}}{\dot{\sigma}} \quad (5)$$

Для учета условий циклического нагружения использовался критерий Бейли (6), описывающий накопление повреждений в ходе усталостного разрушения:

$$\int_0^{t_f} \frac{dt}{\tau(\sigma)} = \int_0^{t_f} \frac{dt}{\tau_0 e^{\left(\frac{U_0 - \gamma \sigma(t)}{kT} \right)}} = 1 \quad (6)$$

где $\sigma(t)$ – временная зависимость изменения напряжений, МПа, которая в общем случае описывается синусоидой (7):

$$\sigma(t) = \bar{\sigma} + \hat{\sigma} \cos(\varphi_i t) \quad (7)$$

где $\bar{\sigma}$ – среднее напряжение в цикле, МПа; $\hat{\sigma}$ – амплитуда напряжений в цикле, МПа.

После подстановки уравнения (7) в уравнение (6) с учетом наличия концентрационного критерия $C^*/C_0 \approx 0,01$ полученное выражение было проинтегрировано с использованием функции Бесселя первого рода нулевого порядка. Наиболее простой случай выражения для расчета циклов до разрушения выражен через уравнение (8):

$$t_f = 0,01\tau_0 \sqrt{2\pi \frac{\gamma \hat{\sigma}}{kT}} \cdot e^{\left(\frac{U_0 - \gamma(\bar{\sigma} + \hat{\sigma})}{kT}\right)} \quad (8)$$

Используя концентрационно-кинетический параметр (5) и входящий в него параметр γ , который несет информацию об уникальной структуре материала, можно определить для данной конструкции интенсивность накопления повреждений. Сравнивались результаты разрушающих усталостных испытаний и расчетные значения, полученные после статических АЭ испытаний стандартных образцов (рисунки 6 и 7), прошедших предварительную наработку в виде 0.3, 0.5 и 0.7 от усталостного ресурса при температуре -60°C , трех уровнях максимального напряжения в цикле – 460, 480 и 500 МПа и коэффициенте асимметрии $R = 0.01$. На полученных временных зависимостях суммарного счета АЭ (рисунок 1) был выделен этап однородного разрушения путем оценки угла линейного участка на временной зависимости логарифма суммарного счета АЭ (рисунок 2). Кроме того, использовался статистический признак – степень разброса параметров АЭ в ходе нагружения (рисунок 3). С помощью численного моделирования подтверждено, что полученный с данного участка временной зависимости структурный параметр γ соответствует массиву структурных элементов, которые в наибольшей степени определяют прочность объекта, то есть принадлежат «колоколу» распределения (рисунок 4). Результаты оценки усталостной долговечности отличались от экспериментальных значений не более чем на 25 % (рисунок 5 и таблица 2).

2. Использование временной зависимости логарифма суммарного счета акустической эмиссии в ходе диагностического

нагружения и рассчитываемого акустико-эмиссионного показателя Y_{AE} позволяет оценивать степень низкотемпературного и деформационного охрупчивания в условиях длительной эксплуатации, а также различных скоростей повышения давления.

Особенности эксплуатации низкотемпературных сосудов вносят существенный вклад в механизм накопления и интенсивность деградиационных процессов. Термофлуктуационная природа конкуренции деформации и разрушения является теоретической основой применения параметра Y_{AE} для оценки степени хрупкого разрушения.

При разрушении в зоне вязко-хрупкого перехода величина эффективной энергии активации пластической деформации и развития микротрещин характеризует конкуренцию этих двух процессов. Таким образом, каждому значению эффективной энергии активации вязко-хрупкого перехода $Q_{ВХП}$ соответствует своя пара значений температуры и скорости пластической деформации вязко-хрупкого перехода, когда доля хрупкого излома начинает превышать 50 %. Совместное влияние температуры нагружения и скорости деформирования описывается параметром Зенера-Холломона (9):

$$\frac{Q_{ВХП}}{k} = T_{ВХП} \ln \left[\frac{\dot{\epsilon}_0}{\dot{\epsilon}_{ВХП}} \right] \quad (9)$$

где $\dot{\epsilon}_0$ – предэкспоненциальный множитель, сек^{-1} ; $\dot{\epsilon}_{ВХП}$ – скорость деформации, соответствующая вязко-хрупкому переходу, сек^{-1} .

Для оценки влияния скорости деформации, а также эффекта деформационного старения проводились АЭ испытания с нагружением образцов (таблица 3) при различной скорости деформирования (от 0,0008 до 1,5 мм/сек), вырезанных из трубы сосуда сжиженного азота и имеющих искусственный концентратор (рисунок 8). По данным временных зависимостей суммарного счета (рисунок 9 (а)) и логарифма суммарного счета АЭ (рисунок 9 (б)) были рассчитаны показатели Y_{AE} и X_{AE} для каждой скорости всех образцов (таблица 4). Результаты анализа зависимости полученных параметров Y_{AE} и X_{AE} от скорости нагружения (рисунок 10) показывают, что: (1) увеличение численного значения параметров Y_{AE} и X_{AE} соответствует увеличению скорости деформирования, то есть более хрупкому разрушению, что делает данные параметры чувствительными к охрупчиванию, и (2) увеличение данных параметров с возрастанием

скорости деформации происходило более интенсивно в случае образцов из бывшего в эксплуатации трубопровода из сосуда для хранения СУГ, что делает данные параметры чувствительными к деформационному старению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является работой, в которой решена актуальная научная задача обоснования метода оценки остаточного усталостного ресурса низкотемпературных сосудов, основанного на использовании информативных параметров потока сигналов акустической эмиссии, полученных в ходе плановых испытаний на основе оценки концентрационно-кинетических показателей Y_{AE} и X_{AE} и учета с помощью них процессов низкотемпературного и деформационного охрупчивания.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Установлено, что наиболее распространенным механизмом разрушения материала объектов хранения сжиженных углеводородных газов является малоцикловая усталость, наиболее продолжительный период эксплуатации занимает этап накопления и коалесценции микротрещин, интенсивность которого зависит от низкотемпературного и деформационного охрупчивания. Эффективным для контроля интенсивности деградиационных процессов в условиях периодических полевых испытаний является метод акустической эмиссии.

2. Разработана методика эксперимента по оценке влияния предварительной усталостной наработки различной степени и при различных уровнях напряжений на величину концентрационно-кинетических показателей Y_{AE} и X_{AE} , а также экспериментов по определению влияния скорости деформации, низкой температуры и деформационного старения на степень охрупчивания стали и смену механизма разрушения.

3. Разработано дополнение к информационно-кинетическому подходу, включающее вывод определяющего выражения для оценки усталостного ресурса по полученному в ходе однократных статических испытаний индивидуальному структурному параметру γ , а также набору стандартных параметров циклического нагружения для

идеальной формы цикла. Показано, что данный структурно-чувствительный параметр связан с параметрами кривой усталости и позволяет проводить расчет числа циклов до разрушения в малоцикловой области для индивидуальной структуры материала конкретного объекта.

4. Изучена связь параметров Y_{AE} и X_{AE} с влиянием скорости деформации, низкой температуры и истории нагружения объекта на процесс охрупчивания стали. Установлено, что данные параметры чувствительны к низкотемпературному охрупчиванию и истории нагружения, что выражается через изменчивость интенсивности накопления микротрещин как результата конкуренции процессов деформации и трещинообразования. Показано, что использование данных параметров поможет учитывать степень деградации материала в ходе длительной эксплуатации.

5. Предложена методика для расчета количества перепадов давления в сосудах для хранения сжиженных углеводородных газов при низкотемпературной эксплуатации, которая включает в себя проведение периодических акустико-эмиссионных испытаний, применение метода «дождя» для подсчета циклов перепада давления в емкости, определение момента времени начала этапа однородного микротрещинообразования, и гипотезу о линейном суммировании повреждений.

6. Дальнейшее развитие темы исследования может быть реализовано в рамках изучения более широкого спектра типов нагружения нефтегазового оборудования, их условий эксплуатации, а также исследовании физической природы накопления повреждения в данных объектах с последующей разработкой новых методик оценки ресурса и прочностных характеристик с помощью метода акустической эмиссии.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Первейталов, О.Г.** Оценка остаточного ресурса емкостного оборудования для хранения газа на основе многоуровневой модели потока сигналов акустической эмиссии / **О.Г. Первейталов,**

В.В. Носов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2022. – №. 1-2. – С. 35-47. DOI: 10.24412/0131-4270-2022-1-2-35-47.

2. Носов, В.В. Учет влияния криогенных температур на усталостный ресурс конструкционных сплавов с помощью акустической эмиссии / В.В. Носов, **О.Г. Первейталов** // Нефтегазовое дело. – 2023. – Т. 21, №. 3. – С. 133-148. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-3-133-148.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. **Perveitalov, O.G.** Calculation of durability and fatigue life parameters of structural alloys using a multilevel model of acoustic emission pulse flow / **O.G. Perveitalov**, V.V. Nosov, A.I. Borovkov [et al.] // Metals. – 2023. – Vol. 13, №4. – P. 1-38. DOI:10.3390/met13010004.

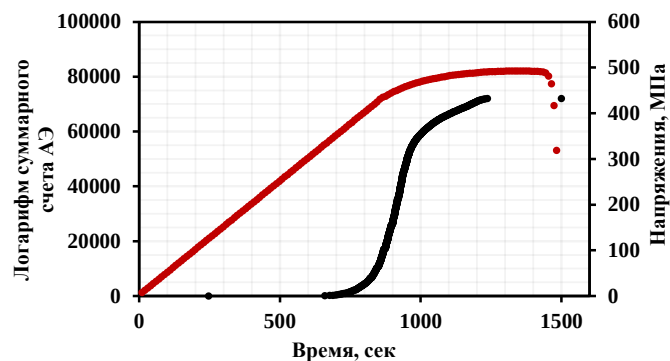
4. **Perveitalov, O.G.** An Approach to Evaluate the Fatigue Life of the Material of Liquefied Gases' Vessels Based on the Time Dependence of Acoustic Emission Parameters: Part 1. / **O.G. Perveitalov**, V.V. Nosov // Metals. – 2025. – Vol. 15, Issue 2. – 36 p. DOI: 10.3390/met15020148.

Публикации в прочих изданиях:

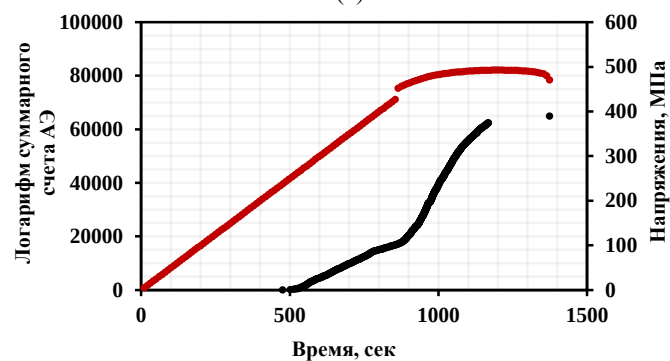
5. **Первейталов, О.Г.** Прогнозирование усталостной долговечности объектов транспорта и хранения углеводородов по результатам акустико-эмиссионных испытаний // Транспорт и хранение углеводородов: Тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции молодых учёных, Омск, 21 апреля 2023 года. – Омск: Омский государственный технический университет, 2023. – с. 139-142.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

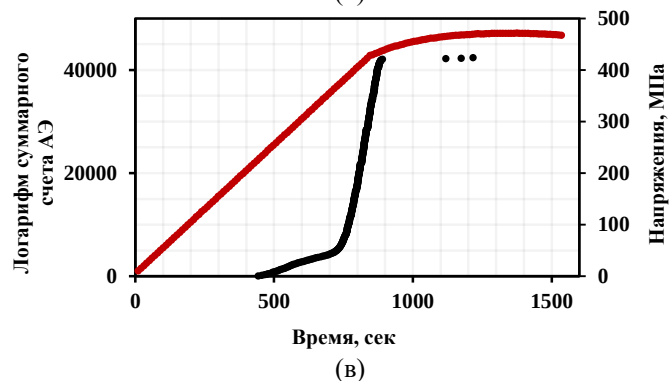
6. Патент на изобретение № 2807407 Российская Федерация, МПК G01N 29/14 (2006.01) Способ определения характеристики трещиностойкости материала. Заявка № 2023114149 : заявл. 30.05.2023 : опубл. 14.11.2023 / В.В. Носов, **О.Г. Первейталов**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 12 с. : ил.



(a)

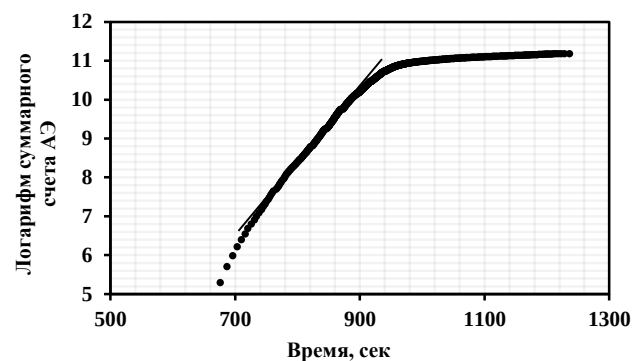


(б)

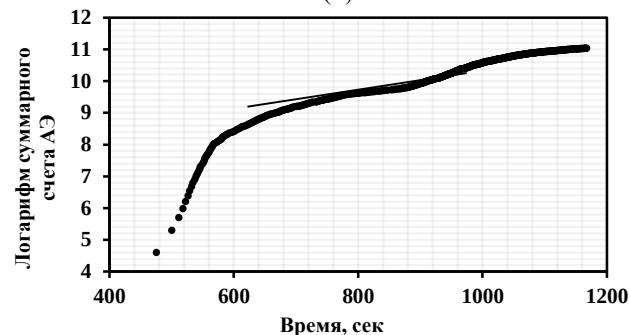


(в)

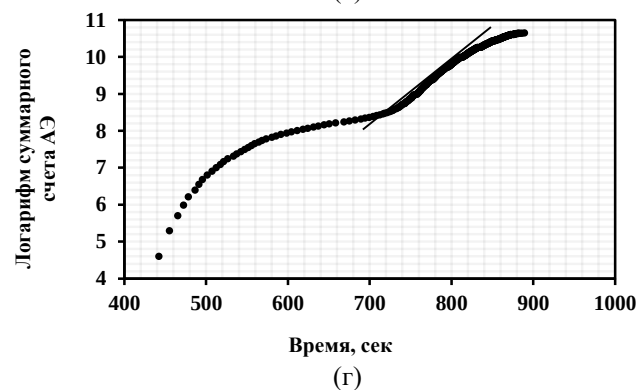
Рисунок 1 – Временные зависимости суммарного счета АЭ: (а) – $N_i/N_f = 0,3$ при $\sigma_{max} = 460$ МПа (Образец VI); (б) – $N_i/N_f = 0,5$ при $\sigma_{max} = 480$ МПа (Образец VII); (в) – $N_i/N_f = 0,7$ при $\sigma_{max} = 500$ МПа (Образец VIII).



(б)

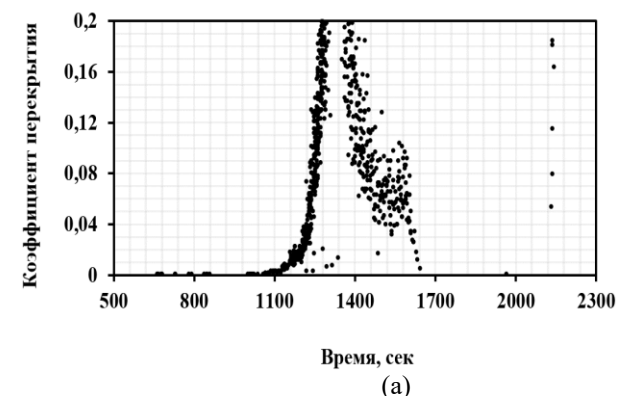


(в)

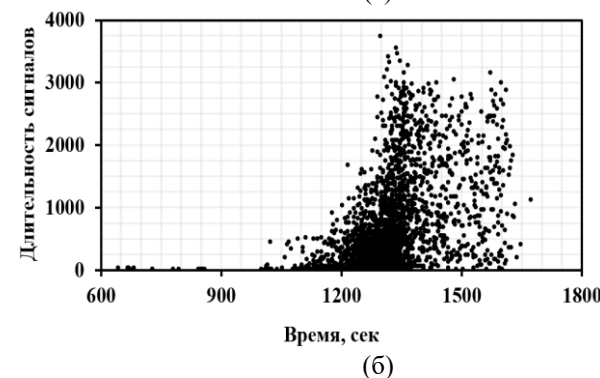


(г)

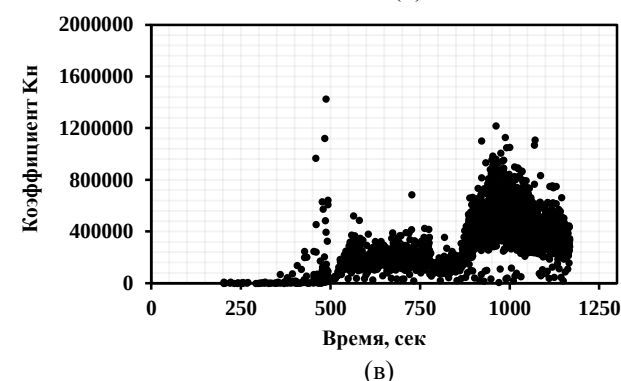
Рисунок 2 – Временные зависимости логарифма суммарного счета АЭ: (а) – $N_i/N_f = 0,3$ при $\sigma_{max} = 460$ МПа (Образец VI); (б) – $N_i/N_f = 0,5$ при $\sigma_{max} = 480$ МПа (Образец VII); (в) – $N_i/N_f = 0,7$ при $\sigma_{max} = 500$ МПа (Образец VIII).



(а)

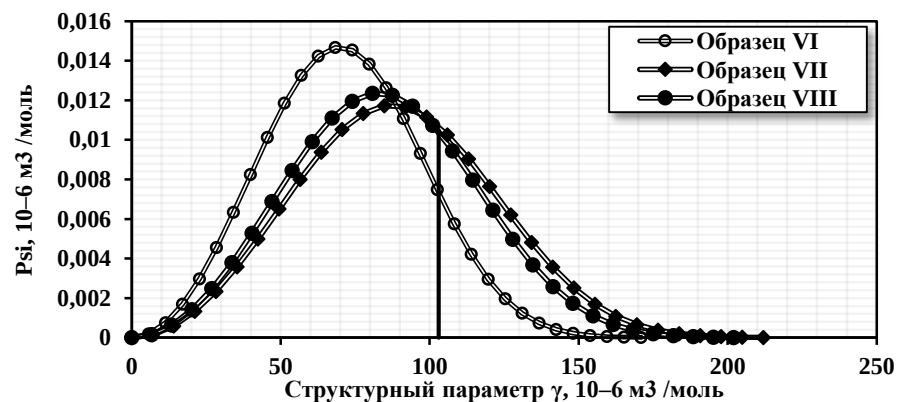


(б)

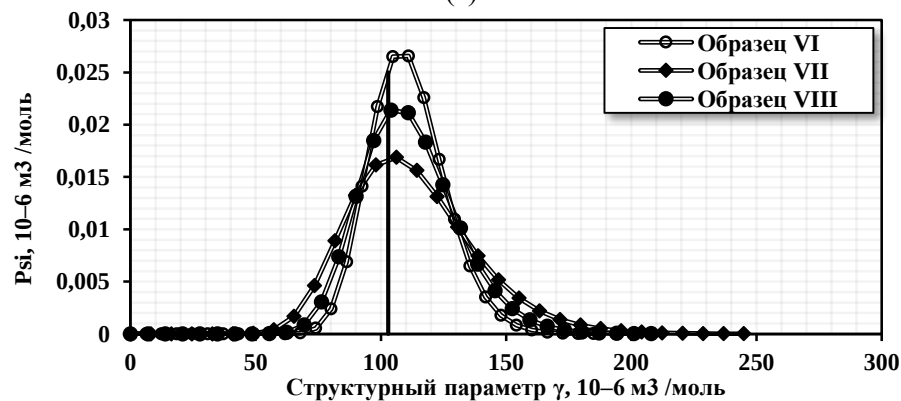


(в)

Рисунок 3 – Временные зависимости: (а) – коэффициент перекрытия сигналов; (б) – длительности сигналов; (в) – коэффициента K_n (отношение активности АЭ к средней длительности сигналов) для $N_i/N_f = 0,3$ при $\sigma_{max} = 460$ МПа (Образец VI)



(а)



(б)

Рисунок 4 – Распределение структурного параметра γ в ходе однородного разрушения образцов VI, VII, VIII: (а) – распределение Вейбулла; (б) – логарифмически-нормальное распределение.

Таблица 1 – Результаты численного моделирования структурной неоднородности образцов прошедших усталостную наработку при отрицательных температурах

Номер образца	t_1	t_2	Вейбулла					Логарифмически-нормальное			
			k	λ	q	$E_A, \%$	$E_{Tf}, \%$	σ_z	μ	$E_A, \%$	$E_{Tf}, \%$
VI	859	916	3	80	0	1,85	5,48	0,17	4,7	1,55	7,69
VII	891	965	3	100	0	1,93	10,04	0,22	4,7	1,52	18,09
VIII	757	799	3	95	0	2,06	4,26	0,135	4,7	1,58	0,27

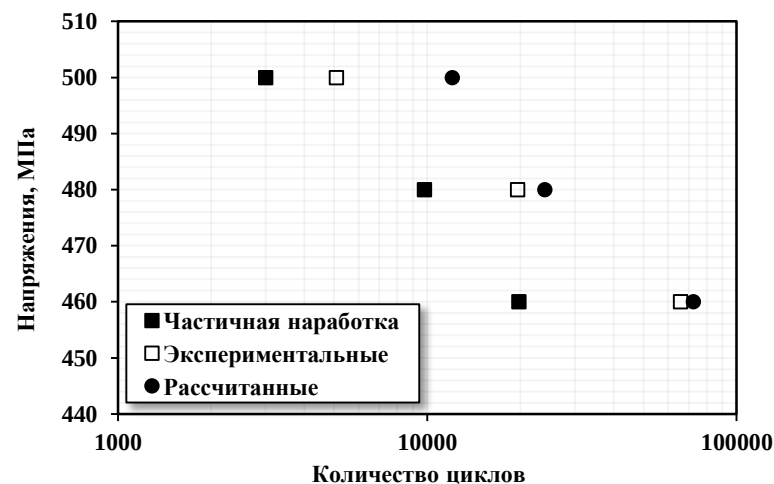


Рисунок 5 – результаты расчета усталостного ресурса по результатам низкотемпературных АЭ испытаний – расчетные и экспериментальные значения усталостного ресурса образцов, прошедших предварительную наработку
Таблица 2 – Результаты расчета усталостного ресурса по результатам низкотемпературных АЭ испытаний

Номер образца	Степень наработки	Максимальное напряжение в цикле, МПа	Среднее напряжение в цикле, МПа	Разрушающее напряжение, МПа	Скорость нагружения, МПа/сек	X_{AE}, c^{-1}
Образец I	Без наработки	-	-	478	0,152	0,005873
Образец VI	0,3	486	237	493	0,5	0,020355
Образец VII	0,5	466	246	493	0,16	0,006613
Образец VIII	0,7	505,5	257	471	0,5	0,02069
Номер образца	Y_{AE}, MPa^{-1}	$U_{AE}, Дж/моль$	$\gamma, \frac{Дж}{моль \cdot МПа}$	Расчетное число циклов до разрушения	Фактический усталостный ресурс	Число циклов предварительной наработки
Образец I	0,0386	146477	-	-	-	-
Образец VI	0,0407	145143	$1,67 \cdot 10^{-22}$	72412	65881	19765
Образец VII	0,0413	150904	$1,69 \cdot 10^{-22}$	23954	19582	9791
Образец VIII	0,0414	148139	$1,70 \cdot 10^{-22}$	12044	5081	3004



(а)



(б)

Рисунок 6 – Испытательное оборудование: (а) гидравлическая разрывная машина Instron 8802 250 kN с расположенным в термокамере образцом для испытаний на малоцикловую усталость с закрепленным датчиком деформации; (б) электромеханическая машина Zwick/Roell Allround Z100 во время испытаний с установленным образцом

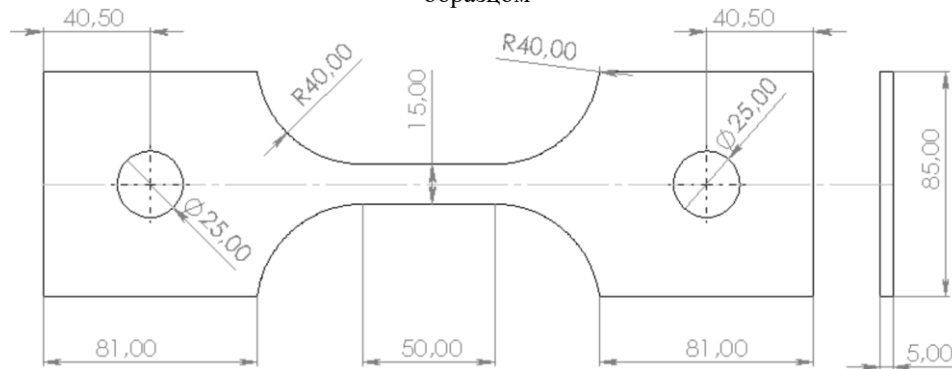


Рисунок 7 – Геометрические размеры образца для испытаний на малоцикловую усталость (первая часть испытаний)



(а)

(б)

Рисунок 8 – Фото образцов из стали 12X18H10T: (а) – изготовленных из новой трубы диаметром $D = 25$ мм; (б) – изготовленных из трубы диаметром $D = 25$ мм после эксплуатации (вторая часть испытаний)

Таблица 3 – Обозначение образцов и скорость деформации

Труба после эксплуатации $D = 42$ мм		Труба после эксплуатации $D = 25$ мм		Новая труба $D = 25$ мм	
Обозначение образца	Скорость нагружения с контролем деформаций, мм/сек	Обозначение образца	Скорость нагружения с контролем деформаций, мм/сек	Обозначение образца	Скорость нагружения с контролем деформаций, мм/сек
Q1	0,005	O2	1	B1	0,1
Q2	0,01	O3	0,1	B2	0,1
Q3	0,1	O4	0,01	B3	0,1
Q4	0,5	O5	0,005	B4	0,05
Q5	1			B5	0,1
Q6	0,5			B6	0,01
Q7	0,05			K1	0,012
Q8	0,075			K2	0,0008
Q9	0,25			K3	1
Q10	0,75				
Q11	1,25				
Q12	1,5				

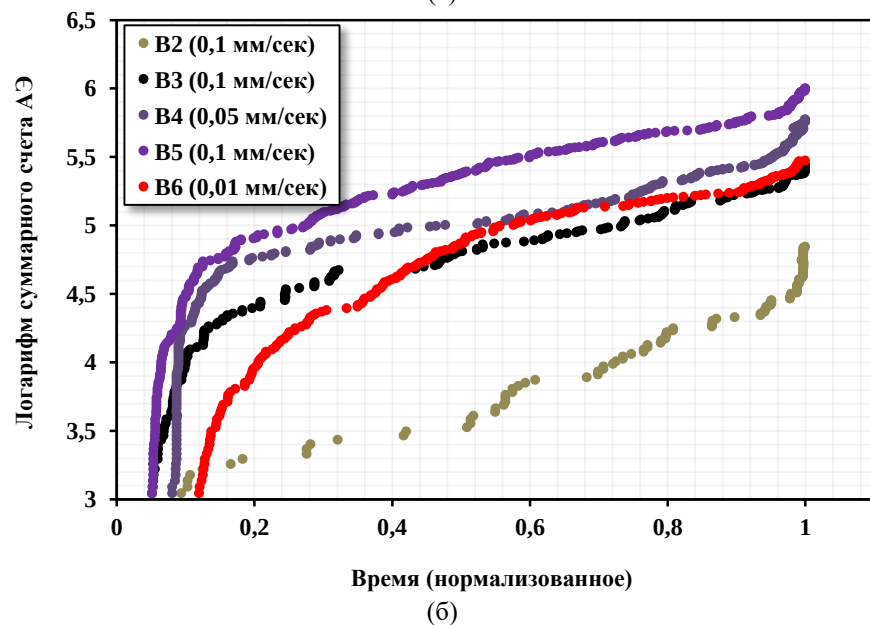
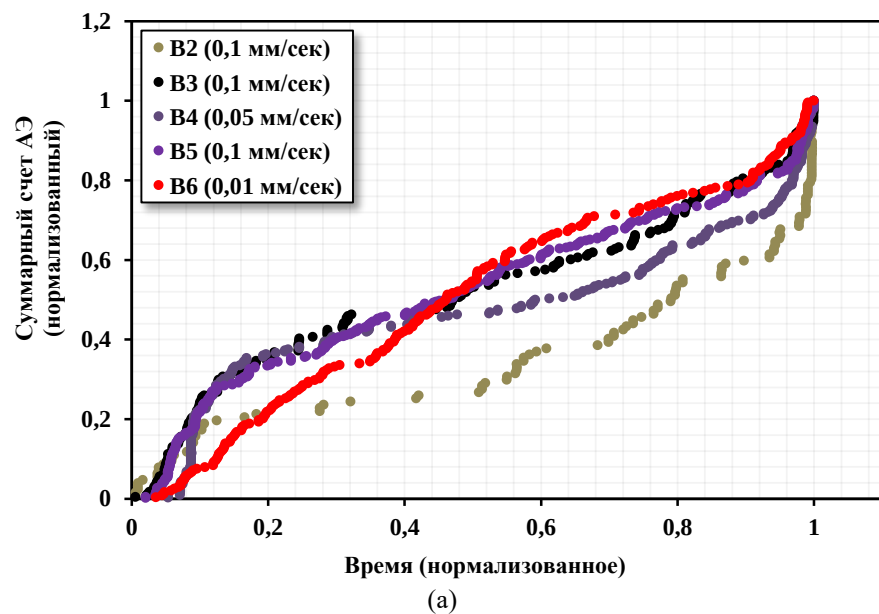
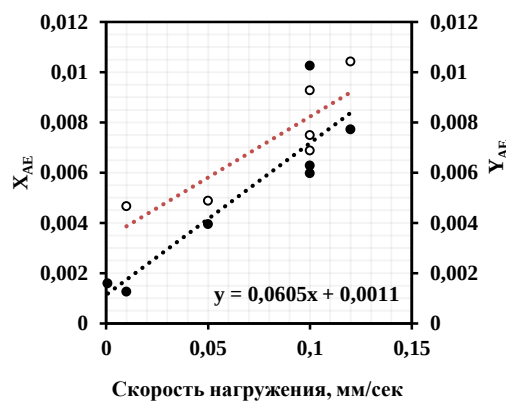


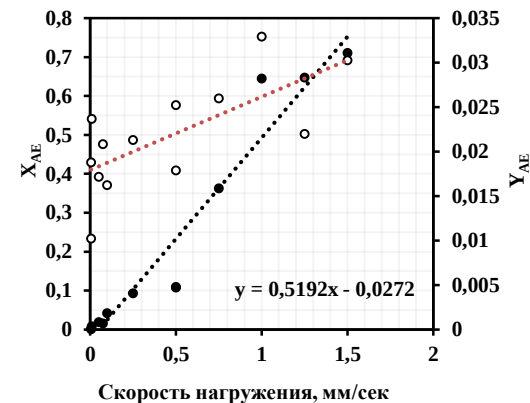
Рисунок 9 – Результаты АЭ испытаний образцов новой трубы диаметром 25 мм: (а) – временная зависимость суммарного счета АЭ; (б) – временная зависимость логарифма суммарного счета АЭ

Таблица 4 – Результаты АЭ испытаний образцов 12Х18Н10Т при различной скорости деформации

Номер образца	Скорость нагружения, мм/сек	X_{AE}	Y_{AE}	Номер образца	Скорость нагружения	X_{AE}	Y_{AE}
B2	0,1	0,0102	0,0069	Q1	0,005	0,0006	0,0102
B3	0,1	0,0063	0,0093	Q2	0,01	0,0078	0,0237
B4	0,05	0,0040	0,0049	Q3	0,1	0,0414	0,0162
B5	0,1	0,0060	0,0075	Q4	0,5	0,1094	0,0252
B6	0,01	0,0013	0,0047	Q5	1	0,6449	0,0329
K1	0,12	0,0077	0,0104	Q6	0,5	0,1076	0,0179
K2	0,0008	0,0016	-	Q7	0,05	0,0185	0,0172
K3	1	0,3077	-	Q8	0,075	0,0153	0,0208
O2	1	0,2427	0,0143	Q9	0,25	0,0923	0,0213
O3	0,1	0,0150	0,0116	Q10	0,75	0,3622	0,0260
O4	0,01	0,0033	0,0120	Q11	1,25	0,6469	0,0220
O5	0,005	0,0018	0,0104	Q12	1,5	0,7107	0,0302



(а)



(б)

Рисунок 10 – Зависимость параметров X_{AE} и Y_{AE} от скорости нагружения образцов: (а) – образцов B2-B6 и K1-K3; (б) – образцов Q1-Q12