

XI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ



СБОРНИК ТРУДОВ

Москва
20–23 апреля 2026 г.



Москва, 2026

УДК [681.518.54+620.19](035)

ББК 30.82-5я2

О-42

Научный комитет:

Махутов Н.А., д-р техн. наук, проф., член-корреспондент РАН;

Науменко А.П., д-р техн. наук, проф.;

Иванов В.И., д-р техн. наук, проф., чл. корр. АЭН;

Барат В.А., д-р техн. наук, проф.;

Растегаев И.А., д-р техн. наук, проф.

О-42 **XI Всероссийская конференция по акустической эмиссии с международным участием:** сб. тр. Москва, 20–23 апреля 2026 г. – М.: Издательский дом «Спектр», 2026. – 182 с.: ил.
ISBN 978-5-4442-0213-5

Сборник содержит научные труды (доклады), представленные на XI Всероссийской конференции по акустической эмиссии с международным участием. Изложены результаты работ ученых и специалистов российских и зарубежных научных и учебных организаций, фирм – лидеров по реализации неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД) методом акустической эмиссии (АЭ). Представлены труды, описывающие опыт теоретического и практического изучения новых способов применения метода АЭ-контроля для решения современных научно-практических задач.

В состав сборника вошли работы по вопросам развития как метода АЭ, так и его нормативной базы, а также работы, посвященные модернизации АЭ-оборудования и методов обработки АЭ-сигналов.

УДК [681.518.54+620.19](035)

ББК 30.82-5я2

ISBN 978-5-4442-0213-5

СОДЕРЖАНИЕ

Комаров А.Г., Терентьев Д.А., Иванов В.И. Разработка руководства по безопасности «Методические рекомендации по порядку проведения акустико-эмиссионного контроля» и подготовка на его основе стандарта организации	5
Харегов К.В., Живоносная Д.М., Сафьяник А.А., Мишунин В.С., Сулов А.В. Обнаружение характерных дефектов в ходе акустико-эмиссионной диагностики оборудования нефтегазового сектора	31
Петерсен Т.Б., Шемякин В.В., Самохвалов А.Б. АЭ-оценка показателей надежности и вероятности отказа при статическом нагружении материалов	45
Пашыков А., Скаженюк В.И. Сравнение методов акустической эмиссии и магнитной памяти металла при дефектоскопии сосудов давления	54
Шелобков В.И., Мусатов В.В., Сазонов А.А., Иванов В.И. Частотно-шумовая характеристика пьезоэлектрических преобразователей	62
Нуриллаев Н.Ш. Применение метода акустической эмиссии для контроля сосуда с внутренней футеровкой в АО «МАХАМ-СНРСНІQ» химической промышленности Республики Узбекистан	70
Башков О.В., Башков И.О., Ромашко Р.В. Распределенные волоконно-оптические датчики: анализ и построение АЧХ	76
Сафьяник А.А., Харегов К.В., Живоносная Д.М., Мишунин В.С., Сулов А.В. Опыт проведения акустико-эмиссионного контроля при сопровождении пневматических испытаний на крупных технологических установках	84
Игумнова Т.В., Герасимов С.И., Игумнов А.А. Возможности математического моделирования акустического тракта при акустико-эмиссионном контроле	98
Се Цзехуэй, Лю Ятин, Сулов А.В. Интеллектуальная система непрерывного акустико-эмиссионного контроля в режиме онлайн на основе Интернета вещей и больших данных	110
Науменко А.П., Кудрявцева И.С., Бурда Е.А. О цифровом представлении акустико-эмиссионных сигналов	125
Барат В.А., Ушанов С.В., Лукашев И.А., Панькина А.А., Лаврик Н.В. Разработка методики выявления процессов сенсбилизации в аустенитных сталях методом акустической эмиссии	133

Попов А.В., Волошина В.Ю., Лебединский М.С. Разработка модели фильтрации акустических процессов.....	137
Данюк А.В., Мерсон Д.Л., Брилевский А.И. Зависимость величины пика мощности АЭ от параметров микроструктуры сплава ZX10 при сжатии.....	140
Мисейко А.Н., Харебов К.В., Мишунин В.С., Живоносная Д.М., Перов К.А., Богатов М.В., Ковалев С.А. Гидравлические испытания гибких полимерных армированных труб несвязной конструкции с применением акустико-эмиссионного метода контроля	150
Живоносная Д.М., Харебов К.В., Мишунин В.С., Суслов А.В. Исследование возможности применения метода акустической эмиссии для определения толщины парафиновых отложений в нефтепроводах и резервуарах.....	166

УДК 620.171.2

**РАЗРАБОТКА РУКОВОДСТВА ПО БЕЗОПАСНОСТИ
«МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОРЯДКУ ПРОВЕДЕНИЯ
АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ»
И ПОДГОТОВКА НА ЕГО ОСНОВЕ СТАНДАРТА ОРГАНИЗАЦИИ**

Комаров А.Г.¹, Терентьев Д.А.², Иванов В.И.³

¹АО «ВНИКТИнефтехимоборудование», Волгоград, Россия.

E-mail: agkomarov@vnikti.rosneft.ru

²ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ», Москва, Россия.

E-mail: tyev@interunis-it.ru

³АО «НТЦ «Промышленная безопасность», Москва, Россия.

E-mail: ivi444@mail.ru

В докладе рассматривается утвержденное приказом Ростехнадзора № 385 от 5 ноября 2025 г. Руководство по безопасности «Методические рекомендации по порядку проведения акустико-эмиссионного контроля», его структура, особенности и отличия от ПБ 03-593-03 «Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов», а также опыт разработки на основе Руководства Стандарта организации в области АЭК.

Ключевые слова: акустико-эмиссионный контроль, нормативный документ, руководство по безопасности

Введение

В 2020 г. регуляторная гильотина перевела «Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов» (ПБ 03-593-03, разработчики – Самарский филиал АО «Оргэнергонефть», ИАЭ им. Курчатова и др., далее – Правила) в состояние недействующих и после этого при проведении акустико-эмиссионного контроля (АЭК) специалисты могли ссылаться только на применяющийся на добровольной основе ГОСТ Р 52727-2007 «Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования» [1] (разработчики ИЯР РНЦ «КИ», Самарский филиал ОАО «Оргэнергонефть», ФГУП «ОКБМ им. Африкантова»). Однако информации, содержащейся в этом ГОСТе, недостаточно для проведения полноценного АЭК промышленных объектов (отсутствует, например, информация о критериях оценки – есть только ссылка на отмененные ПБ 03-593-03).

С другой стороны, с момента утверждения Правил произошло много изменений в нормативных документах [2]. Возникла система обязательных к применению нормативно-правовых документов – федеральных норм и правил, в какой-то степени заменившая систему ПБ, и система рекомендуемых

документов – Руководств по безопасности. Изменился ряд требований к технологическому оборудованию, работающему под давлением – [3, 4], в т. ч. касающихся выполнения испытаний, технического надзора, неразрушающего контроля такого оборудования [5].

Появились российские [1, 6, 7] и европейские [8] нормативные и методические документы, касающиеся акустико-эмиссионного метода контроля, его терминологии, предполагающие новые подходы к проверке оборудования, оценке акустических свойств объектов контроля и результатов АЭК. Докладывались на конференциях, были опубликованы результаты исследований в области оценки состояния оборудования [9], т. е. появились новые критерии, и, кроме того, имеющиеся нуждались в переработке.

Таким образом, разработка стандарта, касающегося акустико-эмиссионного контроля (АЭК), стала необходимой и неизбежной.

Целью разработки являлся документ, заполняющий нормативный вакуум, содержащий рекомендации и методические основы, соответствующие положениям действующих ФНП, РБ, нормативных документов в области промышленной безопасности и неразрушающего контроля – [3–5], т. е. рассматриваемое Руководство по безопасности «Методические рекомендации по порядку проведения акустико-эмиссионного контроля» [10] (далее – Руководство).

Инициатором работы был В.И. Иванов (НТЦ ПБ), исполнителями – А.Г. Комаров (АО «ВНИКТИнефтехимоборудование») и Д.А. Терентьев (ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ»). При подготовке Руководства соавторы РБ отталкивались от работы по модернизации Правил, проведенной ГИАП-ДИСТцентр, которая велась с 2017 г. и завершилась в 2021 г. созданием Стандарта организации СТО ГДЦ 01-04-001.2021 «Техническое диагностирование. Методические рекомендации по проведению акустико-эмиссионного диагностирования (общие положения)».

При подготовке проекта настоящего Руководства использовались также наработки Т.Б. Петерсен (Диапак), В.В. Иноземцева (Диаформ), Н.Н. Ковалова (НТЦ ПБ) и ряда других специалистов.

Работа была в целом закончена к апрелю 2024 г., представлена на заседании ОЭС АЭ (Объединенный Экспертный Совет по проблемам применения метода акустической эмиссии) при РОНКТД, проходившем на конференции АПМАЭ-2024. После обработки замечаний от членов ОЭС АЭ, в июне 2024 г. проект Руководства был рассмотрен и одобрен на НТС Ростехнадзора. Далее рассмотрение Руководства было продолжено в апреле 2025 г. в Рабочей группе при подкомиссии по совершенствованию контрольных (надзорных) и разрешительных функций федеральных органов исполнительной власти при Правительственной комиссии по проведению административной реформы в сфере промышленной безопасности. После ряда согласительных совещаний и обработки более 80 замечаний от членов

Рабочей группы, уточнений и корректировок Руководство было утверждено приказом Ростехнадзора № 385 от 05.11.2025 г.

Параллельно в АО «ВНИКТИнефтехимоборудование», на основе проекта Руководства разрабатывался и в настоящее время обсуждается Стандарт организации «Акустико-эмиссионный контроль сосудов и аппаратов нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств» (см. раздел 5).

1. Предыстория

Предшественником рассматриваемых стандартов являлись методические указания РД 50-447-83 «Расчеты и испытания на прочность. Акустическая эмиссия. Общие положения» (утверждены Постановлением Госстандарта от 30 декабря 1983 г. № 6594, разработчики ВНИИНМАШ, МАИ, ЦНИИТМАШ, ВНИИФТРИ, Институт атомной энергии). Их объем – примерно 10 % от ПБ 03-593-03, основная часть – всего 3 стр. Были предназначены, скорее, для использования метода АЭ в исследовательских целях. Не содержали формул и численных ориентиров, в них не упоминались АЭ-параметры, классы (критерии) опасности, детали нагружения. Определили характеристики аппаратуры, параметры контроля.

Следующий документ – методические рекомендации МР 204-86 «Расчеты и испытания на прочность. Применение метода акустической эмиссии для контроля сосудов, работающих под давлением, и трубопроводов» (разработчики НПО ЦНИИТМАШ, ВНИИНМАШ), одобрены научно-методической комиссией по стандартизации в области применения акустической эмиссии секции НТС Госстандарта «Расчеты и испытания на прочность». Определили требования к организации испытания, программе нагружения, допустимому уровню помех, АЭ-аппаратуре, установке ПАЭ, точности локации, регистрируемому данным. Ввели понятие источников АЭ, их определение, предложили четыре критерия (интегральный, интегрально-динамический, амплитудный, локально-динамический) для оценки источников. Распространялись только на гидравлические испытания сосудов и трубопроводов. В 3-4 раза меньше РД 03-131-97 и ПБ 03-593-03 по объему и содержанию.

Непосредственным предшественником ПБ 03-593-03 являлся стандарт РД 03-131-97 «Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов», утвержденный постановлением Госгортехнадзора России от 11.11.96 № 44 (разработчики – Самарский филиал АООТ «Оргэнергонефть», ЦНТАЭС, МГАХМ), определивший структуру и идеологию как Правил, так и рассматриваемого Руководства. Впервые была описана единая система классификации источников АЭ на четыре класса. Включал все критерии оценки источников из МР 204-86, а также несколько новых (критерии ASME, MONPAC, непрерывной АЭ). По объему меньше Правил примерно на 15 %.

2. Структура Руководства

В целом структура Руководства наследует структуру Правил. Руководство содержит 9 разделов и 6 приложений. Сопоставление его структуры с Правилами приведено в табл. 1.

Таблица 1

Структура ПБ 03-593-03 и Руководства

Раздел	ПБ 03-593-03	Руководство по безопасности
I	Общие положения	Общие положения
II	Общие требования	Основы, особенности, условия и схемы применения АЭК
III	Требования к организации работ, исполнителям и порядок подготовки к выполнению АЭК	Организация проведения АЭК
IV	Требования к аппаратуре и оборудованию	Средства контроля и оборудование
V	Проведение контроля	Проведение контроля
VI	Накопление, обработка и анализ данных	Рекомендации по регистрации, обработке и анализу данных
VII	Оценка результатов контроля	Рекомендации по оценке результатов контроля
VIII	Документальное оформление результатов контроля	Рекомендации по оформлению результатов контроля
IX	Требования безопасности	Требования безопасности
Приложение 1	Форма протокола по результатам контроля	Рекомендуемая форма Протокола АЭК
Приложение 2	Типовой график нагружения	Рекомендуемое содержание отчета по АЭК
Приложение 3	Системы классификации источников АЭ и критерии оценки технического состояния объекта (рассмотрено 7 систем/критериев)	Типовые графики нагружения
Приложение 4	Содержание отчета по контролю	Рекомендуемые системы классификации источников АЭ и критерии оценки технического состояния объекта (рассмотрено 9 систем классификации)
Приложение 5	Форма заключения по результатам контроля	Рекомендуемый образец Заключения по результатам АЭК
Приложение 6	–	Перечень нормативной и другой технической документации, указанной в Руководстве

3. Основные дополнения и изменения в Руководстве

Основное отличие Руководства от Правил – рассматриваемый документ носит рекомендательный характер, в то время как Правила – обязательный.

3.1. Разделы I «Общие положения» и II «Основы, особенности, условия и схемы применения акустико-эмиссионного контроля»

Принципиальных изменений относительно Правил в этих разделах нет, за исключением включения в Руководство эффекта Кайзера (в Правилах эффект Кайзера не упоминался), определение которого дается в разделе II, а использование – в разделе V, в пп. 38.4 и 39.2 – при проведении повторного контроля и при контроле объекта по частям.

3.2. Раздел III «Организация проведения акустико-эмиссионного контроля»

В этом разделе нужно отметить переход от Технологии к Технологической карте контроля, в соответствии с положениями [5]. Рекомендуемую форму Технологической карты контроля планируется привести как приложение в следующих редакциях Руководства. Удален текст про возможность получения акустических и АЭ-параметров объекта из технической и научной литературы. Вместо этого рекомендуется получить эти параметры при предварительном изучении объекта (используя, в том числе, отдельный выезд с АЭ-аппаратурой) или использовать, в качестве предварительных, параметры АЭ-контроля аналогичных объектов. Нужно отметить, что определение акустических параметров объекта перед АЭК – важная сфера применения портативной, малоканальной АЭ-аппаратуры с автономным питанием – типа UNISCOPE (ИНТЕРЮНИС-ИТ) или PocketAE (РАС).

3.3. Раздел IV «Средства контроля и оборудование»

АЭ-аппаратура

Исключены требования регулировки усиления АЭ-аппаратуры с шагом 1 дБ, выравнивания чувствительности каналов. Машинное масло, глицерин в качестве примеров контактной среды для установки ПАЭ заменены на литол и солидол (литол и солидол лучше соответствуют условиям промышленного АЭК, как более вязкие и имеющие соответствующий рабочий температурный диапазон) (п. 22 Руководства).

Скорректированы предложения про температурную стабильность ПАЭ, исключены положения о редко используемых в АЭК направленных преобразователях, преобразователях поверхностных волн. Рекомендованная длина кабеля ПАЭ/предусилитель ограничена 1 м.

Электронный имитатор

В Руководстве незначительно изменены рекомендации к электронным имитаторам в части частоты следования импульсов, которая составляет **не менее 1 Гц** (было 1–100 Гц), поскольку непосредственно при контроле электронный имитатор используется обычно для сравнения амплитуд сигналов, и избыточная частота излучения не требуется; в части длительности переднего фронта **ступенчатого импульса** (уточнение введено впервые) имитатора, не превышающей 0,1–0,2 мкс; а также в части амплитуды генерируемых импульсов, которая подбирается так, чтобы обеспечивать значения амплитуды импульсов на приемных преобразователях в диапазоне **30 мкВ – 50 мВ (30–94 дБАэ с учетом затухания)** (было 10 мкВ – 30 мВ (20–90 дБАэ)).

Источник Су – Нильсена

Приведены детальное описание источника Су – Нильсена, его эскиз и размеры насадки (которая достаточно легко может быть изготовлена с помощью 3D-принтера).

Источник Су – Нильсена (рис. 1) представляет собой слом графитового стержня цангового карандаша диаметром 0,3–0,5 мм, твердостью 2Н(2Т), выдвинутого на 2,5 мм; угол наклона стержня к поверхности объекта выдерживается приблизительно в 30°, например, за счет использования специальной пластиковой (например, фторопластовой) насадки (п. 25 Руководства).

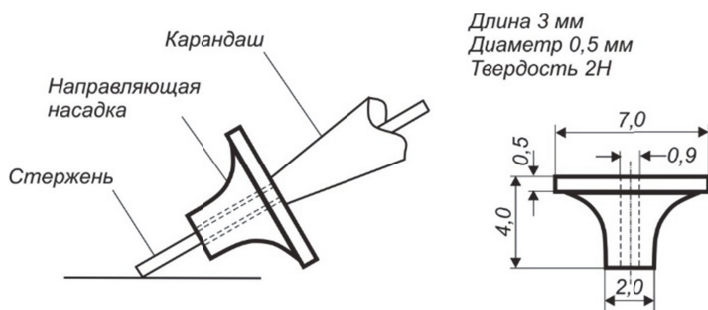


Рис. 1. Источник Су – Нильсена

Проверка ПАЭ с помощью акрилового стержня

В Руководство добавлена методика проверки и сравнения чувствительности рабочих ПАЭ с помощью акрилового стержня (40×800 мм) в соответствии с ASTM E2075/E2075M. Standard Practice for Verifying the

Consistency of AE-Sensor Response Using an Acrylic Rod (Стандартная процедура верификации стабильности отклика преобразователя АЭ с помощью акрилового стержня) [11].

Для выполнения проверки применяется источник Су – Нильсена и стержень из прозрачного полированного литого акрила диаметром 40 мм и длиной 800 мм, плоские и гладкие торцы которого перпендикулярны образующей (рис. 2). На расстоянии 100 мм и 300 мм от одного из торцов выполняют отметки, минимизирующие возможность проскальзывания грифеля, касания стержня металлическими частями карандаша и удара по стержню отскокившей частью сердечника при его сломе (например, выемка диаметром 1 мм и глубиной 0,1 мм). Стержень располагается горизонтально на твердой поверхности или на паре призм, с отметками на 12 часов и закрепляется в этом положении (п. 27 Руководства).

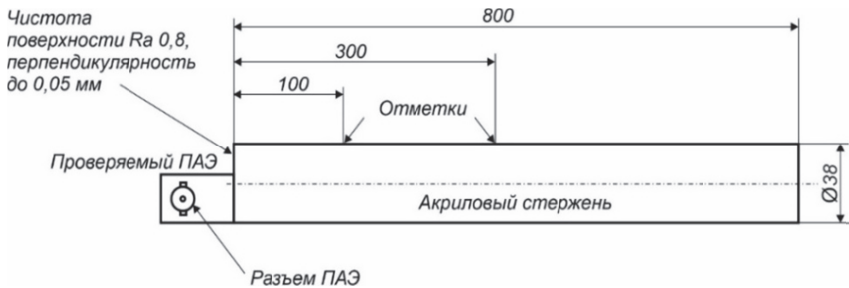


Рис. 2. Проверка ПАЭ с помощью акрилового стержня

Проверяемый ПАЭ устанавливают на новую смазку и притирают к торцу стержня.

Для исключения сползания ПАЭ опирается боковой стороной на ту же поверхность, что и стержень. Если ПАЭ имеет боковой провод/разъем, разъем располагают в положении на 3 часа. Источник Су – Нильсена устанавливают под углом 30° к поверхности и под углом примерно 20° к оси акрилового стержня в направлении к ПАЭ так, чтобы исключить удар грифеля о ПАЭ.

Нужно отметить, что подобная схема проверки ПАЭ хорошо работает и с электронным имитатором, преобразователь которого притирается на смазке к противоположному проверяемому ПАЭ торцу стержня (рис. 3). Амплитуда импульсов имитатора подбирается так, чтобы на проверяемом ПАЭ регистрировалась необходимая амплитуда. Такая схема проверки ПАЭ обеспечивает высокую стабильность и повторяемость результатов.

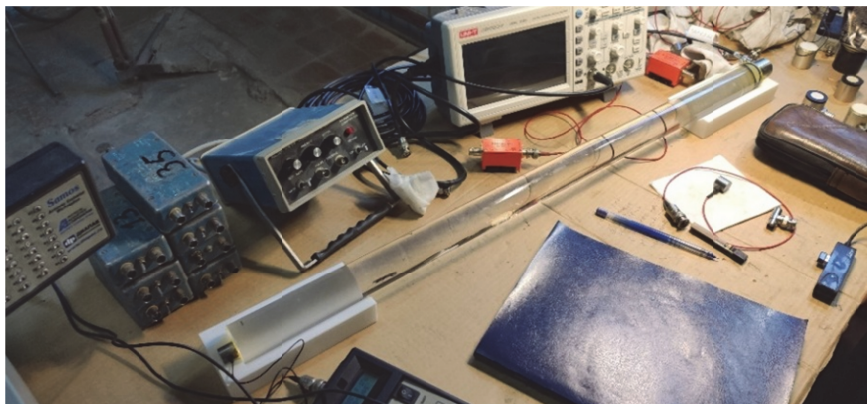


Рис. 3. Проверка ПАЭ с использованием акрилового стержня и электронного имитатора

Аттестационные процедуры

При подготовке Руководства острая дискуссия имела место вокруг необходимости поверки АЭ-аппаратуры и ПАЭ. В результате было решено, что детальное описание калибровки, поверки слишком обширно, требует большого объема дополнительной работы и должно находиться в отдельных документах – обновлениях РД 03-299-03 и РД 03-300-99, и не дублироваться в данном Руководстве. Поэтому положения раздела, касающиеся аттестационных процедур [7] сформулированы максимально открыто:

– **П. 27.** Рекомендуется выполнять проверку рабочих ПАЭ перед каждым контролем, но не реже 1-го раза в год. Проверка работоспособности ПАЭ не заменяет их **аттестационных испытаний**. Результаты проверки рабочих ПАЭ заносят в журнал проверки ПАЭ;

– **П. 30.** АЭ-аппаратура и ПАЭ **подлежат** периодическим **аттестационным испытаниям**, проводимым в соответствии с распространяющимися на них положениями действующего законодательства.

Периодичность испытаний АЭ-аппаратуры и ПАЭ устанавливается их производителем.

К проведению контроля допускаются технические средства, включая АЭ-аппаратуру и ПАЭ, имеющие действующие документы об аттестационных испытаниях.

3.4. Раздел V «Проведение контроля»

Установка ПАЭ. Имитаторы.

Акустические характеристики объекта контроля

При подготовке положений Руководства, касающихся установки ПАЭ (п. 32), типа локации и схемы установки ПАЭ (пп. 34, 35), акустических параметров объекта контроля (пп. 35.3–35.7) использованы опыт и лучшие практики АЭК, положения стандартов EN 14584, EN 15495.

Необходимо отметить п. 32 – в нем представлены рекомендации по установке и креплению ПАЭ, кабелей, предусилителя и т. п. так, чтобы исключить потерю контакта, механическое нагружение и смещение ПАЭ, трение кабелей о поверхность объекта; пп. 34, 35, касающиеся выбора схемы установки ПАЭ и типа локации; пп. 35.3–35.7, касающиеся определения акустических параметров объекта контроля.

Расчетная локация по разнице времени прихода (термин, объединивший линейную, планарную и подобные типы локации) рассматривается в Руководстве как основной тип локации. Зонная локация рассматривается как допустимая в случае невозможности либо нецелесообразности определения координат источников акустической эмиссии.

Определение акустических параметров объекта контроля: затухания, максимального расстояния между ПАЭ, эффективной скорости изложено в пп. 35.3–35.7. Приведены типы имитаторов, которые рекомендуется использовать при определении этих параметров, а также при проведении проверки работоспособности АЭ-аппаратуры (табл. 2).

Таблица 2

Имитаторы АЭ-сигнала

Процедура	Пункт Руководства	Рекомендуемый тип имитатора
Проверка качества установки ПАЭ	33, 38.2	Су – Нильсена, электронный имитатор
Контрольная проверка	38.3	Су – Нильсена, электронный имитатор
Определение характерных для объекта контроля значения АЭ-параметров	38.7	Су – Нильсена
Затухание, определение расстояния между ПАЭ	35.4	Су – Нильсена
Скорость звука	35.7	Су – Нильсена
Погрешность определения координат	36.3–36.4	Су – Нильсена
Адаптивная локация	41	Су – Нильсена, электронный имитатор

Нужно отметить введенное впервые в рассматриваемом Руководстве описание выбора максимального расстояния между ПАЭ в соответствии со стандартом EN 14584 и с использованием фактора «К» (коррекции амплитуды источника) Значение фактора «К» принимается в соответствии с положениями стандарта EN 13445-5. Смысл фактора «К» – задать максимальное расстояние между ПАЭ так, чтобы обеспечить регистрацию источника на «К» дБ слабее, чем источник Су – Нильсена. Фактор «К» принимается как 12 дБ для сталей с расчетным пределом текучести до 355 МПа и как 6 дБ для сталей с расчетным пределом текучести выше 355 МПа. Максимальное расстояние между ПАЭ (d_{MAX}) рекомендуется выбирать так, чтобы сигнал от источника, расположенного в любом месте контролируемой зоны, с амплитудой на K дБ ниже амплитуды имитатора Су – Нильсена, регистрировался тем минимальным количеством ПАЭ, которое требуется для расчета координат (рис. 4).

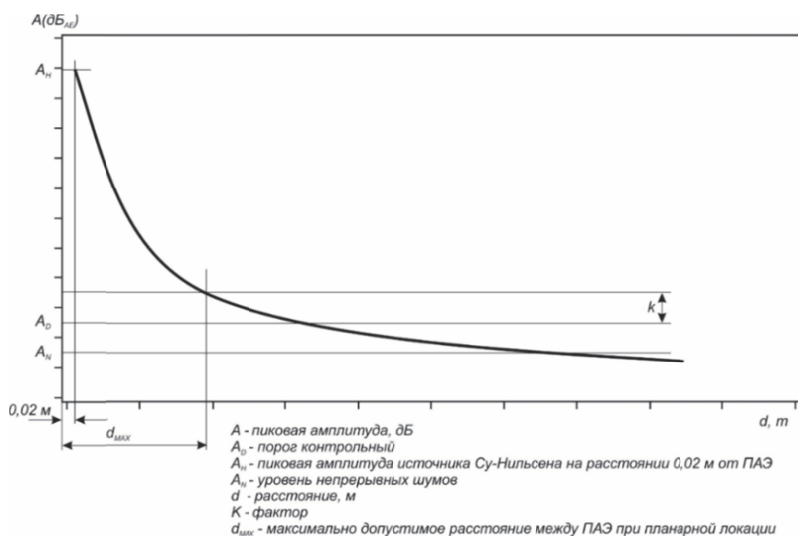


Рис. 4. Выбор расстояния между ПАЭ для расчетной локации

Аналогично определяется максимальное расстояние между ПАЭ для зонной локации. Его задают так, чтобы обеспечить регистрацию сигнала АЭ от имитатора Су – Нильсена в любом месте контролируемой зоны по меньшей мере одним ПАЭ и с амплитудой не менее заданной. Для этого рекомендуется принимать максимальное расстояние между ПАЭ не более чем в 1,5 раза больше порогового, которое определяется как расстояние, на котором амплитуда сигнала от имитатора Су – Нильсена снижается на Kz дБ относительно слома грифеля на расстоянии 0,02 м от ПАЭ. Как правило, величина Kz принимается равной 20 дБ (рис. 5).

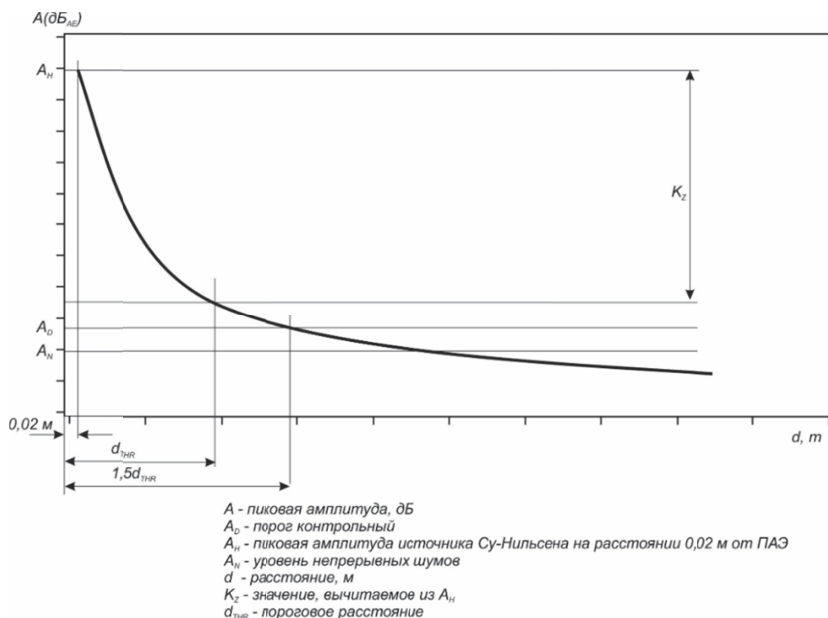


Рис. 5. Выбор расстояния между ПАЭ для зонной локации

Локация. Погрешность локации

Пункты Руководства, относящиеся к локации (пп. 36–37) изменены в части уточнения допустимой погрешности локации: «погрешность расчетной локации не должна превышать величину, равную двум толщинам стенки объекта контроля, длине волны на рабочей частоте ПАЭ или 5 % расстояния между ПАЭ, в зависимости от того, какая величина больше», добавлены также некоторые источники погрешности вычисления координат, в частности:

- некорректные алгоритмы расчета координат программным обеспечением применяемой АЭ-аппаратуры;
- погрешность измерения времени поступления импульса акустической эмиссии на преобразователи;
- несоответствие типа и частотного спектра акустических волн от имитатора и от реального источника акустической эмиссии;
- использование в одной антенне ПАЭ разного типа, с разной чувствительностью, а также каналов с разными порогами и частотными фильтрами.

Локационная восстановленная амплитуда

В п. 37 Руководства впервые введен термин «локационная восстановленная амплитуда» – амплитуда, которая наблюдалась бы на ПАЭ, установленном в непосредственной близости от источника акустической эмиссии и даны рекомендации по ее определению. Локационная восстановленная амплитуда событий может быть вычислена, если известно расстояние от ПАЭ до источника и есть информация о параметрах затухания. Алгоритмы расчета восстановленной амплитуды разработаны на основе положений стандарта EN 14584. Локационная восстановленная амплитуда используется во многих системах оценки состояния по результатам АЭК (см. Приложение 4) и может быть рассчитана по трем вариантам:

Вариант 1:

По **фиксированному коэффициенту затухания**. Локационная амплитуда может быть определена по формуле

$$A_C = A_M + \alpha \cdot d_S,$$

где A_C – локационная амплитуда события, дБ_{АЭ};

A_M – зарегистрированная амплитуда события на ПАЭ, дБ_{АЭ};

d_S – расстояние от источника акустической эмиссии до соответствующего ПАЭ, м;

α – фиксированный коэффициент затухания, дБ/м.

Коэффициент затухания определяют с помощью источника Су – Нильсена, на дистанциях d_1 и d_2 от ПАЭ и регистрации соответствующих амплитуд $A_{ИМ1}$ и $A_{ИМ2}$. Рекомендуемые значения дистанций $d_1 = 0,02$ м, $d_2 = d_{МАХ}$. Коэффициент затухания рассчитывают по формуле

$$\alpha = \frac{A_{ИМ1} - A_{ИМ2}}{d_2 - d_1}.$$

Вариант 2:

Методом линейной аппроксимации с учетом **затухания в ближнем и дальнем поле ПАЭ**. Ближнее поле ПАЭ определяют, как область вокруг ПАЭ с радиусом 20 толщин стенки ($20e$). Дальнее поле ПАЭ – область за ближним полем. Локационная амплитуда может быть определена по формуле

$$A_C = \begin{cases} A_M + \beta d_S, & d_S \leq d_2; \\ A_M + \beta d_2 + \alpha(d_S - d_2), & d_S > d_2, \end{cases}$$

где α – фиксированный коэффициент затухания в дальней зоне, дБ/м;

β – фиксированный коэффициент затухания в ближней зоне, дБ/м.

Значение коэффициентов затухания α и β определяют с помощью слова источника Су – Нильсена на дистанциях d_1 , d_2 и d_3 от ПАЭ и регистрации соответствующих амплитуд $A_{ИМ1}$ ($d_1 = 0,02$ м), $A_{ИМ2}$ ($d_2 = 20e$) и $A_{ИМ3}$ ($d_3 = d_{МАХ}$) (e – толщина стенки объекта, м):

$$\alpha = \frac{A_{ИМ2} - A_{ИМ3}}{d_3 - d_2}; \quad \beta = \frac{A_{ИМ1} - A_{ИМ2}}{d_2 - d_1}.$$

Вариант 3:

С помощью аппроксимированных данных кривой затухания (п. 35.4 Руководства).

Программное обеспечение современных АЭ-систем, как правило, поддерживает определение локационной амплитуды по одному или нескольким алгоритмам.

*Нагружение объекта контроля.
Сосуды и трубопроводы, резервуары*

В части нагружения объекта контроля, в Руководство добавлены положения о максимальном соответствии типа НДС объекта при испытании и эксплуатации, а также о необходимости учета разницы в типе НДС при анализе результатов контроля. Добавлено положение о том, что, если источники акустической эмиссии не развиваются в условиях приложенной нагрузки, то они могут быть не выявлены при контроле.

При формировании программы нагружения вместо формул точного определения пробного давления и информации о продолжительности выдержек, как было в Правилах, в Руководстве внимание сосредоточено на принципах определения испытательного давления – его рекомендуется задавать так, чтобы не менее чем на 5–10 % превысить рабочее давление – эксплуатационную нагрузку ($P_{РАБ}$), но не превысить пробное давление ($P_{ПР}$), определяемое в соответствии с требованиями нормативных документов, действующих в отношении объекта контроля. Так, при проведении контроля объекта, находящегося в эксплуатации, по схемам пп. 12.1, 12.2, 12.5 Руководства (т. е. если контроль проводится не в режиме ГИ/ПИ), испытательную нагрузку (давление) рекомендуется определять с учетом рабочей нагрузки (давления), **температурного коэффициента** и положений п. 39.6 Руководства (т. е. пункта о превышении на 5–10 % эксплуатационной нагрузки). Если контроль проводится как сопровождение ГИ/ПИ объекта, то как пробное давление, так и продолжительность выдержек принимаются в соответствии с **действующими нормативными документами (стандартами)**.

Программа нагружения в соответствии с положениями Руководства имеет следующие особенности или дополнения:

Рабочее нагружение рекомендуется проводить ступенчато, с выдержками нагрузки на уровнях $0,5 P_{РАБ}$, $0,75 P_{РАБ}$, $1,0 P_{РАБ}$ и $P_{ИСП}$. Добавлено следующее: **дополнительная выдержка между $P_{РАБ}$ и $P_{ИСП}$, если разница между ними превышает 25 % от $P_{ИСП}$; а также допустимое изменение давления в процессе выдержки – не более чем на 2,5 % от испытательного давления** (п. 39.17). Продолжительность промежуточных выдержек в 10 мин теперь определена как «минимальная рекомендуемая» (в Правилах было – «должна, как правило, составлять 10 мин») (п. 39.10).

Если при нагружении объекта были выявлены источники акустической эмиссии II или III класса (раздел VII Руководства) или получены неопределенные результаты, рекомендуется выполнить **второй рабочий цикл нагружения объекта с изменением нагрузки от 50 до 98 % испытательного давления** (ранее – до 100 %). Кроме того, рекомендуемый график нагружения теперь включает такие же выдержки давления во втором нагружении, как и на первом. Два рабочих цикла нагружения объекта рекомендуется выполнять при контроле вновь изготовленных объектов или объектов после ремонта с применением сварки (п. 39.24, рис. 6).

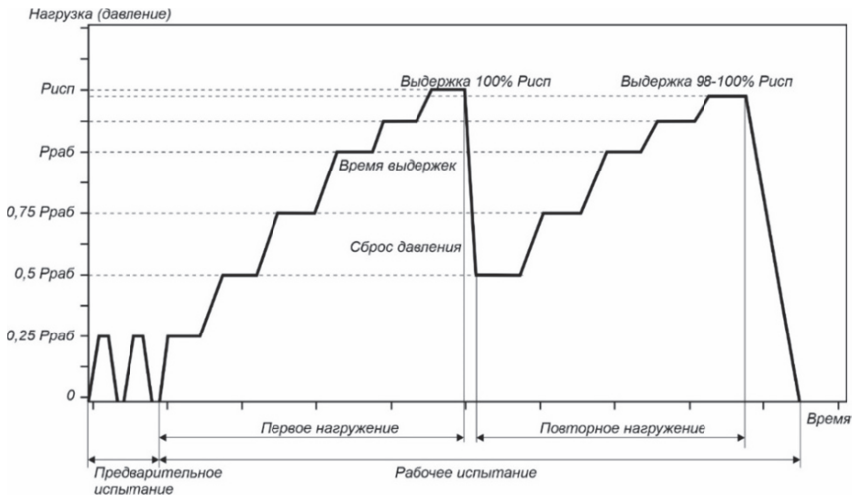


Рис. 6. Рекомендуемый график нагружения объектов контроля

Добавлен важный пункт, касающийся связи критической температуры хрупкости материала объекта контроля и температуры испытательной среды и стенки объекта контроля. Температура испытательной среды/стенки должна быть не менее чем на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше критической температуры хрупкости материала объекта контроля и указана разработчиком объекта

контроля в технической документации. При отсутствии указаний температура испытательной среды должна быть от 5 до 40 °С (п. 39.30).

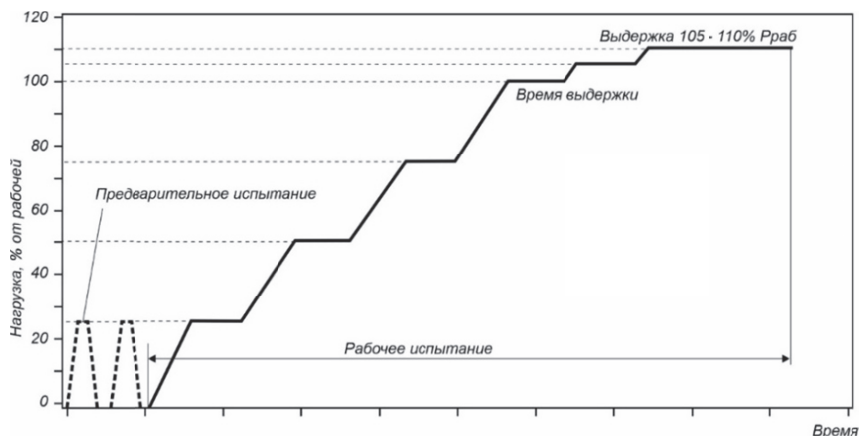


Рис. 7. Рекомендуемый график нагружения при АЭ-сопровождении ГИ-резервуара

В приложении 3 Руководства приведен рекомендуемый график нагружения резервуаров для хранения нефти, нефтепродуктов и других жидких и газообразных сред при их гидравлическом испытании (п. 39.20, рис. 7).

Шумы и помехи

В Руководстве расширен перечень возможных источников шумов. Добавлено (см. п. 40.2 Руководства): электромагнитное излучение двигателей, реле и других электрических устройств, помехи от сварки; собственные шумы аппаратуры; помехи от перемещения персонала по площадкам обслуживания, передвижение автотранспорта, проведение сварочных и монтажных работ, работа подъемно-транспортных механизмов; воздействие окружающей среды (дождя, ветра, снега и так далее), причем не только на сам объект контроля, но и конструкции, расположенные рядом.

Введено важное дополнение: «При неблагоприятных погодных условиях или вследствие необходимости выполнения ремонтно-монтажных работ на объекте контроля испытание следует перенести на другое время».

В п. 40.5 Руководства приведены приближенные к практике рекомендации по допустимому уровню стационарных помех, приведены конкретные значения порога при испытании: «Не рекомендуется проводить контроль при уровне стационарных помех, превышающем 36 дБ_{АЭ} и значении порога, превышающем 42 дБ_{АЭ}».

3.5. Раздел VI «Рекомендации по регистрации, обработке и анализу данных»

В части выявления источников АЭ и экспресс-анализа данных Руководство дополнено положениями о необходимости выявления в реальном времени источников АЭ, соответствующих не только IV, но и **III классу** (п. 41). Сразу после окончания контроля Руководством рекомендуется выполнить предварительную обработку данных с целью идентификации, определения и проверки местоположения источников акустической эмиссии. Местоположение выявленных источников акустической эмиссии **II–IV классов и/или зон повышенной АЭ-активности** рекомендуется подтверждать **адаптивной локацией** с использованием имитатора непосредственно после испытаний, после снижения нагрузки до безопасного уровня и до удаления испытательной среды, или использованием других методов (видов) неразрушающего контроля.

Вместо этапов фиксированной продолжительности (согласно ПБ 03-593-03), классификацию источников акустической эмиссии в Руководстве рекомендуется выполнять по этапам в зависимости от реализованной программы нагружения. Рекомендуется рассматривать отдельно первое и повторное нагружения (п. 44). **Кластеры**, в которые входят лоцированные события, **рекомендуется анализировать отдельно** с целью с определения характеристик соответствующего кластеру источника акустической эмиссии и его классификации (п. 43, 48).

3.6. Раздел VII «Рекомендации по оценке результатов контроля»

Исключено положение ПБ 03-593-03 о допустимом уровне источника, который устанавливает исполнитель при подготовке к АЭ-контролю конкретного объекта, поскольку классификация на четыре класса приведена ниже и, в соответствии с классификацией и определениями, «допустимые» источники – это источники только класса I.

Формулировки и мероприятия для источников, относящихся к определенному классу (п. 51), приведены аналогично ГОСТ Р 52727-2007:

– источник I класса – соответствует неопасному дефекту. Его регистрируют для анализа динамики развития;

– источник II класса – соответствует развивающемуся, умеренно опасному дефекту. Его регистрируют и следят за развитием ситуации в процессе выполнения данного испытания...;

– источник III класса – соответствует развивающемуся, опасному дефекту. Его регистрируют и следят за развитием ситуации в процессе выполнения данного контроля; предпринимают меры по подготовке возможного сброса нагрузки...;

– источник IV класса – соответствует катастрофически опасному дефекту. Проводят немедленную остановку нагружения, уменьшение нагрузки до нуля либо до значения, при котором класс источника акустической эмиссии снизится до уровня II или I класса....

В пп. 53, 54 Руководства отражено, что если в результате проведения контроля источники АЭ не зарегистрированы или обнаружены источники, относящиеся только к допустимым классам (т. е. только класса I, п. 51), то проведение дополнительных видов контроля не требуется. Источники АЭ, относящиеся к недопустимым классам, рекомендуется оценивать с использованием дополнительных методов контроля, в том числе разрушающего. Также рекомендуется использовать дополнительные методы (виды) НК в случае, если интерпретация результатов контроля неопределенна.

3.7. Разделы VIII «Рекомендации по оформлению результатов контроля» и IX «Требования безопасности», Приложения 1, 2, 3, 5

Положения раздела VIII «Рекомендации по оформлению результатов контроля» в целом соответствуют положениям соответствующего раздела ПБ 03-593-03, с учетом рекомендательного характера Руководства.

Раздел IX «Требования безопасности» расширен в соответствии с требованиями действующих нормативных документов. Добавлена рекомендация о разработке инструкции по безопасному проведению пневматических испытаний оборудования, включающей расчет охранной зоны.

Приложения 1, 2 и 5 – рекомендуемые формы Протокола, Отчета и Заключения по результатам АЭК соответствуют аналогичным приложениям Правил.

Приложение 3 (Типовые графики нагружения) переработано – включены два типа нагружения – для сосудов и резервуаров. Повторное нагружение для сосудов выполняется с выдержками и до 98 % испытательного давления. Приведен график нагружения для гидравлического испытания резервуаров.

3.8. Приложение 4 «Рекомендуемые системы классификации источников акустической эмиссии и критерии оценки технического состояния объекта»

По сравнению с ПБ 03-593-03 некоторые системы классификации значительно переработаны, кроме того, две системы классификации добавлены. Все системы классификации проанализированы и проработаны с точки зрения их практического применения, даны более понятные и универсальные формулы в критериях «активность – сила», локально-динамическое, концентрационно-динамическое (псевдоэнергии заменены на энергию, интервалы по одному событию заменены на определяемые оператором, в критерии «активность – сила источника» удалены приведенные по ошибке

интервалы k). Добавлена формула для оценки MARSE по амплитуде. Добавлены первоисточники для каждой системы классификации:

1. Амплитудный критерий [12] (значительно переработан).
2. Классификация по показателю «активность-сила источника акустической эмиссии» [12] (интегральный критерий, переработан).
3. Классификация по критерию Иванова – Быкова [12] (локально-динамический, значительно переработан).
4. Классификация по концентрационно-динамическому показателю источника акустической эмиссии [13] (интегрально-динамический критерий, переработан).
5. Критерии Кода ASME [14] (незначительно переработан).
6. Классификация источников акустической эмиссии в технологии МОНРАС [15] (уточнен, переработан).
7. Критерий непрерывной акустической эмиссии (без изменений).
8. Классификация источников акустической эмиссии по амплитудно-спектральному критерию [9] (введен впервые).
9. Критерии стандарта EN 14584 [8] (введен впервые).

Амплитудный критерий

(Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика)

Амплитудный критерий в Руководстве значительно переработан – математика расчета изменена, но общая идея оставлена. Критерий использует восстановленную локационную амплитуду (ЛА). Исходя из условия перехода развития повреждений материала объекта контроля из стадии пластической деформации, в стадию объединения микротрещин в макротрещину и ее развития в виде магистральной трещины, выбирается уровень амплитуды $A_{ак}$ (на практике – 50–60 дБ_{АЭ}), относительно которого проводят классификацию источников акустической эмиссии (табл. 3). Значения N1 и N2 подбираются экспериментально.

Таблица 3

Классификация по амплитудному критерию

Класс источника АЭ	Признаки формирования класса источника АЭ
Источник I класса	Источник, для которого зарегистрировано от 1 до N1 импульсов акустической эмиссии с ЛА меньшей $A_{ак}$, и ни одного импульса с локационной амплитудой выше $A_{ак}$
Источник II класса	Источник, для которого зарегистрировано более N1 импульсов акустической эмиссии с ЛА меньшей $A_{ак}$, и ни одного импульса с локационной амплитудой выше $A_{ак}$
Источник III класса	Источник, для которого зарегистрировано от 1 до N2 импульсов акустической эмиссии с ЛА, превышающей $A_{ак}$
Источник IV класса	Источник, для которого зарегистрировано более N2 импульсов акустической эмиссии с ЛА, превышающей $A_{ак}$

«Активность – сила» источника АЭ
 (Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика)

1. В ПБ 03-593-03 этот критерий назывался «Интегральный критерий». В Руководстве критерий переработан с учетом возможности практического использования.

2. **Активность источника (A)** определяется числом излученных импульсов, а **сила источника (J)** есть средняя амплитуда импульсов, излученных источником за время наблюдения.

$$A = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{N_{k+1}}{N_k}; \quad J = \frac{U_S}{U_\Sigma}.$$

3. Классификация – в соответствии с табл. 4, при этом W – коэффициент, определяемый в предварительных экспериментах.

Таблица 4

Классификация по критерию «активность – сила»

	$J < W$	$J > W$	$J \gg W$
$A < 1$	I	II	III
$A \approx 1$	II	II	III
$A > 1$	III	III	IV

Классификация по критерию Иванова – Быкова
 (Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика)

1. В Правилах критерий Иванова – Быкова назывался «Локально-динамический критерий». В Руководстве математика расчетов критерия изменена, но общая идея оставлена.

2. Зависимость суммарного счета АЭ (N) от параметра нагружения (P) аппроксимируют зависимостью:

$$N = aP^m.$$

3. Увеличение нагрузки на ΔP стимулирует рост дефекта (трещины), что проявляется в регистрации приращения величины суммарного счета акустической эмиссии на ΔN . Величина этого приращения связана с величиной **показателя m** следующим выражением:

$$m_{i(N)} = \frac{\Delta N_i / N_i}{\Delta P_i / P_i},$$

здесь $\Delta N_i = N_{i+1} - N_i$, $\Delta P_i = P_{i+1} - P_i$.

4. Классификация источников акустической эмиссии по показателю m_i в соответствии с табл. 5.

5. Критерий рекомендуется применять в режиме зонной локации для первых импульсов событий и не рекомендуется применять на выдержках давления.

Таблица 5

Классификация по значению показателя « m »

Класс источника АЭ	Значение показателя m_i
I	$m_i < 1$
II	$m_i \approx 1$
III	$1 < m_i < 6$
IV	$m_i > 6$

Классификация по концентрационно-динамическому показателю (NDIS 2412-80, Япония)

В Правилах классификация по концентрационно-динамическому показателю называлась «Интегрально-динамический критерий». В Руководстве детали изменены (квадрат амплитуды заменен на энергию), но общая идея расчета оставлена. По коэффициенту концентрации источника и суммарной энергии составляющих его событий определяют Ранг источника, а по величине, характеризующей динамику его энерговыделения – Тип. Окончательная классификация источника выполняется по Рангу и Типу на 4 класса.

Критерии Кода ASME

Критерии кода ASME приведены в разделе 12 тома V ASME Boiler & Pressure Vessel Code (BPVC) [14]. Этот стандарт определяет АЭК при испытаниях сосудов, работающих под давлением, и регламентирует квалификацию персонала, определяет требования к подготовке АЭ-аппаратуры, принципам размещения ПАЭ, допустимому уровню шумов, к программе нагружения, испытательной нагрузке, в стандарте приводятся критерии приемки/оценки для зонной локации, требования к отчетным документам.

В табл. 6 приведены критерии ASME BPVC, позволяющие оценить пригодность объекта к эксплуатации. Критерии приведены в общем виде и могут служить основой при формировании критериев пригодности к эксплуатации для конкретных объектов. Конкретные значения параметров зависят от условий АЭК, материала объекта и его состояния. При подготовке Руководства уточнен перевод некоторых положений стандарта, например, касающийся выдержек давления.

Таблица 6

Критерии кода ASME

Объект	Эмиссия в процессе выдержки нагрузки	Скорость счета	Число импульсов	Число импульсов высокой амплитуды	MARSE или амплитуда	Активность	Порог оценки, дБАЭ
Первое нагружение. Сосуды, работающие под давлением, не прошедшие термообработку после проведения сварочных работ	Не более E_n импульсов после времени T_n	Не используется	Не используется	Не более E_d импульсов выше заданной амплитуды	MARSE или амплитуда импульсов не увеличивается с увеличением нагрузки	Активность не увеличивается с увеличением нагрузки	I_{TH}

Классификация источников АЭ в технологии MONPAC

Добавлены первоисточники технологии MONPAC [15], приведены условия и порядок применения технологии. Уточнена известная таблица критериев MONPAC (табл. 7). Приведен анализ интенсивности и его результат – **диаграмма зональной интенсивности** – ZIP. Диаграмма ZIP приведена в Руководстве в уточненном виде.

Таблица 7

Табличные критерии технологии MONPAC

Объект контроля	Активность в течение выдержек нагрузки	Изменение суммарной длительности в процессе нагружения	Количество импульсов	Импульсы высокой амплитуды	Скорость приращения суммарного уровня сигнала импульсов АЭ	Порог оценки, дБАЭ
3.a Новые сосуды, первое нагружение*		Не применяется	Не применяется	Амплитуды всех импульсов не выше 65 дБАЭ		60
3.b Новые сосуды, повторное нагружение	Не более 2-х импульсов на канал за выдержку, не считая первых 2-х минут	Не более 2500 мкс на канал при повышении нагрузки на 10 % от рабочей	Не более 20 импульсов	Амплитуды всех импульсов не выше 65 дБАЭ для углеродистых сталей, никеля, титана, циркония и не более 60 дБАЭ для алюминия, монеля, нержавеющей сталей (300 и 400 серий) и Hastelloy	Накопленный уровень сигнала не растет с ростом нагрузки	50

Классификация по амплитудно-спектральному критерию

1. Классификация по амплитудно-спектральному критерию [9] впервые введена в нормативный документ. Внесение критерия было одобрено секцией акустической эмиссии Совета экспертов системы неразрушающего контроля Госгортехнадзора России для включения в очередную редакцию ПБ 03-593-03 (протокол Совета № 3/2003 от 30.07.2003).

2. Технология предполагает применение широкополосных ПАЭ и акустико-эмиссионной аппаратуры с полосой пропускания не менее 100–700 кГц.

3. Для каждого из зарегистрированных событий АЭ в режиме реального времени вычисляется комплексный параметр «**Опасность**» (D), который является функцией трех параметров первого импульса события: **Амплитуды** импульса, параметра **Формы** импульса, который характеризует его «непрерывность» или «дискретность» и параметра **Высокочастотности** спектра импульса.

4. Формирование параметра «Опасность» из параметров импульса может строиться несколькими методами, например: методом нечеткой логики (fuzzy logic), методом нейронных сетей (neural network) или построением эмпирической зависимости.

5. Параметр «Опасность» используется в реальном времени как для визуализации, так и для фильтрации различных помех.

6. Для каждого источника, для 10 событий с наибольшим значением D , вычисляется **показатель Опасности (S)**:

$$S = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} D_i \cdot$$

7. Финальная классификация приведена в табл. 8.

Таблица 8

Классификация источников по Показателю Опасности

Класс источника АЭ	Значение показателя S , усл. ед.
I	$50 \leq S < 100$
II	$100 \leq S < 300$
III	$300 \leq S < 600$
IV	$600 \leq S$

Критерии стандарта EN 14584

Критерии стандарта EN 14584 также впервые введены в российский стандарт, касающийся АЭК. Стандарт EN 14584 [8] определяет порядок

АЭК при испытаниях металлического оборудования с использованием планарного алгоритма локации. Если испытание проводят с учетом требований стандарта EN 14584, включая расположение ПАЭ, калибровку каналов АЭ-аппаратуры, программу нагружения, определение параметров регистрации данных, то, как в реальном времени, так и при пост-обработке, оценка источников АЭ может быть выполнена по следующим характеристикам АЭ-активности и локационной амплитуде событий АЭ:

- **рост активности** – опережающее нарастание активности АЭ или энергии по любому каналу по сравнению с увеличением нагрузки;
- **события высокой амплитуды** – регистрация N1 лоцированных событий АЭ с ЛА, выше предварительно заданной «высокой амплитуды» A1;
- **события на выдержках** – регистрация N3 лоцированных событий АЭ с ЛА выше предварительно заданного значения AC2, зарегистрированных в течение t_H мин выдержки давления. Отсчет периода t_H начинается после 2 мин с начала выдержки;
- **концентрация высокоамплитудных событий** – регистрация NC1 лоцированных событий АЭ с ЛА, выше предварительно заданной «высокой амплитуды в кластере» AC1, зарегистрированных в кластере, сторона которого составляет Z мм;
- **концентрация низкоамплитудных событий** – регистрация NC2 лоцированных событий АЭ с ЛА, выше предварительно заданной «низкой амплитуды в кластере» AC2, зарегистрированных в кластере, сторона которого (или диаметр) составляет Z мм.

Локационная амплитуда определяется по данным затухания в соответствии с положениями п. 37 Руководства или приложения А стандарта EN 14584. Численные значения ЛА (A1, AC1, AC2) и количества зарегистрированных событий (N1, NC1, NC2), размер кластера Z, время выдержки t_H могут различаться для первого и повторного нагружения, для реального времени и при пост-обработке.

4. Практическое использование Руководства

На основе Руководства в настоящее время подготовлен и находится в процессе обсуждения проект Стандарта организации АО «ВНИКТИ-нефтехимоборудование» «Акустико-эмиссионный контроль сосудов и аппаратов нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств».

Стандарт уточняет и дополняет Руководство в следующих основных моментах:

- в отличие от Руководства формулировки СТО имеют, в основном, форму императива;
- объекты контроля, на которое распространяется СТО – оборудование, изготовленное по ГОСТ 34347 и эксплуатируемое в соответствии

с положениями ФНП «Правила промышленной безопасности при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением», СТО 00151526-006-2022, СТО 00151526-008-2025 или СТО 00151526-009-2025 (СТО разработаны АО «ВНИКТИнефтехимоборудование»);

- СТО распространяется на ограниченный перечень схем АЭК;
- в СТО приведены выявляемые при проведении АЭК типы дефектов и сравнение АЭК с другими видами (методами) неразрушающего контроля;
- при проведении АЭК в соответствии с СТО использование преобразователей давления является обязательным;
- приведены конкретные параметры настройки АЭ-аппаратуры:
 - необходимое количество рабочих каналов АЭ-системы;
 - тип и значение порога аппаратуры;
 - коэффициент усиления предусилителей, величина дополнительного усиления АЭ-системы;
 - частотный диапазон фильтров;
 - регистрируемые параметры АЭ-импульсов;
 - значения временных параметров регистрации (интервалов контроля импульса, контроля пика, мертвого времени, максимальной длительности);
 - настройка параметрических входов;
- приведен алгоритм проверки работоспособности АЭ-аппаратуры и подготовки ее к проведению АЭК;
- в части Программы нагружения – приведены рекомендации по выполнению повторного нагружения при выявлении источника АЭ II или III класса или неопределенных результатов испытания;
- приведены рекомендации по составу и заполнению Рабочего протокола АЭК;
- приведены требования к Предварительному отчету;
- исключено положение о «допустимом» классе источника. Источники класса II и выше должны быть идентифицированы и оценены;
- приведены рекомендации по проведению ДДК;
- требования безопасности дополнены в соответствии с положениями локальных нормативных документов Компании, включены положения о размерах и/или расчете охранной зоны при испытании;
- приведена форма Технологической карты АЭК (как приложение);
- в СТО дополнительно включена классификация источников АЭ по стандарту ASTM E569;
- в СТО как приложение приведены типичные ошибки при проведении АЭК и их возможные последствия.

5. Выводы

Основные итоги проведенной работы:

– терминология, классификация источников АЭ в Руководстве приведены в соответствие с ГОСТ Р 52727, ГОСТ Р 55045 и проектом ГОСТ Р ИСО 12716;

– проведена актуализация Руководства с учетом современного технического уровня применяемой АЭ-аппаратуры и состояния нормативно-правовой базы, в т. ч. в части программ нагружения объектов контроля;

– приведены рекомендации по практической проверке оборудования, определению акустических параметров объекта контроля, обновлена информация о схемах нагружения, добавлена информация об эффекте Кайзера, даны рекомендации по использованию имитаторов;

– при определении схем локации и классификации источников АЭ более детально описана кривая затухания, введено использование локационной восстановленной амплитуды, даны способы ее определения с учетом затухания АЭ-сигнала;

– системы классификации источников АЭ и критерии оценки технического состояния объекта обновлены с учетом возможности их практического применения;

– опыт АО «ВНИКТИнефтехимоборудование» показывает, что Руководство может использоваться не только как самостоятельный документ, но и быть основой для дальнейшей разработки стандартов в области АЭК;

– некоторая статистика (по сравнению с текстом Правил, которые, конечно, являлись отправной точкой для Руководства):

- мера схожести текстов 37 %. Размер увеличен на 30 %;
- относительно объема Правил: 62 % оставлено, 38 % изменено, 30 % добавлено;
- относительно объема Руководства: 48 % исходного, 29 % измененного, 23 % добавленного.

Список литературы

1. ГОСТ Р 52727-2007. Национальный стандарт Российской Федерации. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования.

2. Отечественные и зарубежные стандарты по акустической эмиссии. Сравнительная оценка и перспективы стандартизации / А.И. Сагайдак, Д.А. Терентьев, С.В. Елизаров, В.В. Бардаков, В.И. Иванов, К.А. Медведев // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24. № 2 (272). С. 32–58. DOI: 10.14489/td.2021.02.pp.032-058. URL: https://www.td-j.ru/images/stories/pdf_states/td_2021_02_pp_032_058_open.pdf (eLibrary ID: 45333693)

3. Федеральные нормы и правила «Правила промышленной безопасности при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением», утверждены приказом Ростехнадзора от 15 декабря 2020 г. № 536.

4. Федеральные нормы и правила «Правила безопасной эксплуатации технологических трубопроводов», утверждены приказом Ростехнадзора от 21 декабря 2021 г. № 444.
5. Федеральные нормы и правила «Основные требования к проведению неразрушающего контроля технических устройств, зданий и сооружений на опасных производственных объектах», утверждены Ростехнадзора от 1 декабря 2020 г. № 478.
6. ГОСТ Р ИСО 12716. Контроль неразрушающий. Акустическая эмиссия. Словарь.
7. ГОСТ Р 8.568-2017. Национальный стандарт Российской Федерации. Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения.
8. EN 14584:2013. Non-destructive testing – Acoustic emission – Examination of metallic pressure equipment during proof testing – Planar location of AE sources (Контроль неразрушающий. Метод акустической эмиссии – Контроль металлического оборудования, работающего под давлением, во время контрольных испытаний – Плоскостная локация источников АЭ).
9. Яковлев, А.В. Алгоритм нечеткой логики в системе акустико-эмиссионной диагностики КАЭМС / А.В. Яковлев, С.В. Балдычев // Электронный журнал «Техническая акустика». 2024. № 1. <http://ejta.org> (eLibrary ID: 11665186).
10. Руководство по безопасности «Методические рекомендации по порядку проведения акустико-эмиссионного контроля», утверждены приказом Ростехнадзора от 5 ноября 2025 г. № 385.
11. ASTM E2075/E2075M – 15. Standard Practice for Verifying the Consistency of AE-Sensor Response Using an Acrylic Rod (Стандартная процедура верификации стабильности отклика преобразователя АЭ с помощью акрилового стержня).
12. Иванов, В.И. Акустико-эмиссионная диагностика: справ. / В.И. Иванов, В.А. Барат. М.: Издательский дом «Спектр», 2017.
13. NDIS 2412-80. Acoustic Emission Testing of Spherical Pressure Vessel Made of High Tensile Strength Steel and Classification of Test Results (Акустико-эмиссионный контроль сферических сосудов высокого давления из высокопрочной стали и классификация по результатам контроля).
14. ASME BPVC.V Article 12. Acoustic emission examination of metallic vessels during pressure testing (Требования к котлам и сосудам, работающим под давлением. Раздел V. Статья 12. Акустико-эмиссионный контроль металлических сосудов при испытаниях под давлением).
15. The MONPAC System (Система MONPAC) / Timothy J. Fowler, James A. Blessing, Peter J. Conlisk and Terry L. Swanson // Journal of Acoustic Emission. 1989. Vol. 08. No. 3. Pp. 1–8. http://acwg.org/jae/JAE-Vol_08-1989.pdf

УДК 534.08

ОБНАРУЖЕНИЕ ХАРАКТЕРНЫХ ДЕФЕКТОВ В ХОДЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕГАЗОВОГО СЕКТОРА

Харегов К.В.¹, Живоносковская Д.М.¹, Сафьяник А.А.¹,
Мишунин В.С.¹, Суслов А.В.²

¹Общество с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр «ЭгидА»,
Самара, Россия. E-mail: aegis-rus@aegis-rus.com

²Самарский государственный технический университет,
Самара, Россия. E-mail: a.v.suslov@inbox.ru

Статья обобщает опыт выявления нетипичных дефектов при акустико-эмиссионном контроле оборудования нефтегазовой отрасли на примере трех предприятий. Проанализированы технические и технологические особенности оборудования и его типовые дефекты. Даны рекомендации по повышению точности акустико-эмиссионного контроля, достигаемого за счет предварительного изучения объекта контроля и целенаправленного повышения квалификации персонала.

Ключевые слова: акустико-эмиссионный контроль, дефекты, нефтегазовая промышленность, локационные карты, отслоение плакировки, водородное расслоение (блистеринг), напряженно-деформированное состояние сварного шва

Введение

Метод акустической эмиссии (АЭ) является распространенным методом неразрушающего контроля, используемым на предприятиях нефтегазовой промышленности. Причина его популярности заключается в обширных диагностических возможностях и хорошо проработанной нормативной базе [1–5]. Согласно нормативной литературе, наиболее подходящими для контроля дефектами являются:

- движение трещины;
- развитие пластической зоны в вершине трещины;
- пластическая деформация;
- трение берегов трещины и разрушение продуктов коррозии;
- коррозия под напряжением;
- отслоение и разрушение включений в материалах с гетерогенной структурой;
- разрыв элементов матрицы и отслоения в материалах с матричной структурой;
- течеобразование;
- фазовые переходы.

Стоит отметить, что рассмотренный метод рекомендуется использовать совместно с другими методами, например визуальным, радиационным, ультразвуковым, капиллярным, вихрековым, тепловым. Это связано с повышенными отраслевыми требованиями к безопасности, а также со стремлением получить наиболее полную карту дефектов, что повышает эффективность инспекционных мероприятий. При этом на схожих по назначению предприятиях используется аналогичный по составу набор оборудования и установок, что облегчает прогнозирование отказов за счет расширенного сбора статистических данных. Одной из попыток систематизировать полученные в этой области знания можно назвать международные стандарты [6, 7]. Исходя из них можно сделать вывод, что на похожем оборудовании при идентичных технологических условиях образуются схожие типы дефектов в аналогичных местах. При этом частота появления типовых дефектов может существенно различаться, а также при возникновении нетипичных для данного вида оборудования условий могут возникать редкие типы дефектов, которые в некоторых случаях можно отнести к случайным. В данной статье рассмотрены три объекта, расположенные на территории различных нефтеперерабатывающих предприятий, на которых выявлены дефекты, не характерные либо редко встречающиеся на таком типе оборудования при проведении АЭ-контроля.

Результаты акустико-эмиссионного контроля технического состояния

Так как метод достаточно хорошо изучен, существует стандартная аппаратура, предназначенная для проведения АЭ-контроля. В ООО «НТЦ «ЭгидА» используются акустико-эмиссионные измерительные комплексы A-Line DDM-1 и A-Line DDM-2. В качестве чувствительных элементов применяются преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ), как правило, резонансного типа, например, GT200, GT205 производства ООО «Глобал-Тест» (г. Саров), BT1 производства ООО «Донские измерительные системы» (г. Ростов-на-Дону) или SR190 производства ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ» (г. Москва).

Объект 1. Корпус камеры коксования

Коксование представляет собой периодический процесс термического крекинга тяжелого нефтяного сырья (гудрона, асфальтов), при котором реакция образования кокса происходит не в трубчатой печи, а в самих камерах (реакторах). В связи с вышеописанными особенностями технологического процесса и техническими характеристиками объекта диагностирования, основными типами дефектов на таких объектах являются выпучивание корпуса, термоциклическое растрескивание, дефекты опорной юбки,

термическая деформация, повреждение внутреннего лакирующего слоя и эрозия внутренних элементов.

Для проведения контроля на корпусе камеры коксования были размещены ПАЭ (рис. 1). Схема расстановки была разработана в том числе с учетом типовых мест возникновения дефектов на оборудовании данного типа.

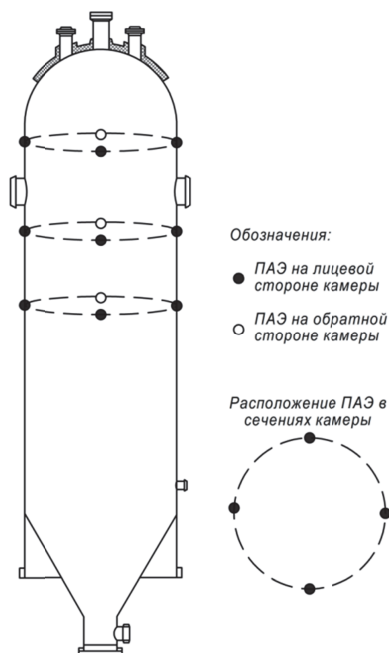


Рис. 1. Места установки ПАЭ на корпусе камеры коксования

При настройке оборудования коэффициент усиления каналов и порог амплитудной дискриминации выбирался с учетом ожидаемого диапазона амплитуд сигналов АЭ. Проверялось значение порога, число выбросов сигнала АЭ, энергия, амплитуда и другие параметры, необходимые для надежной оценки технического состояния корпуса камеры коксования. Параметры настройки каналов приведены в таблице.

Также были определены акустические свойства объекта АЭ-контроля, а именно – затухание и скорость распространения сигналов АЭ в материале корпуса камеры коксования. Среднее значение коэффициента затухания упругих волн составило 5,6 дБ/м. Скорость распространения упругих волн составила 3015 м/с.

**Параметры настройки каналов СКДМ «А-Line»,
используемые при АЭ-контроле корпуса камеры коксования**

Рабочая полоса частот АЭ-канала, кГц	Тип ПАЭ	Рабочая частота ПАЭ, кГц	Коэффициент усиления ПУ, дБ	Порог по каналам, дБ
30–500	GT200	165	34	50,01 (ПАЭ № 1)
30–500	GT200	165	34	50,01 (ПАЭ № 2)
30–500	GT200	165	34	50,01 (ПАЭ № 3)
30–500	GT200	165	34	50,01 (ПАЭ № 4)
30–500	GT200	165	34	50,01 (ПАЭ № 5)
30–500	GT200	165	34	50,01 (ПАЭ № 6)
30–500	GT200	165	34	50,01 (ПАЭ № 7)
30–500	GT200	165	34	50,01 (ПАЭ № 8)
30–500	GT200	165	28	49,99 (ПАЭ № 9)
30–500	GT200	165	34	50,01 (ПАЭ № 10)
30–500	GT200	165	34	50,01 (ПАЭ № 11)
30–500	GT200	165	34	50,01 (ПАЭ № 12)

Анализ данных позволил установить, что наиболее информативным в части регистрации источников АЭ, обусловленных развитием дефектов, представляющих опасность для целостности и работоспособности камеры, является временной отрезок рабочего цикла, соответствующий времени коксования продукта.

В ходе АЭ-контроля было выявлено 12 зон (обведены контуром зеленого цвета на рис. 1) источников АЭ II класса (активных), обусловленных наложением двух синхронных процессов: развитием дефектов и действием шумов. Такое наложение снижает достоверность оценки динамики развития дефектов и степени их опасности для целостности камеры, а также

затрудняет верификацию дефектов. В частности, подобная ситуация наблюдается для зон C1, C1.1, C3, C5, C6, C7, C9, C12, C13, представленных на рис. 2. Также в ходе АЭ-контроля выявлено 8 зон (обведены контуром синего цвета на рис. 2) источников АЭ I класса (пассивных), не представляющих опасности для его целостности. Классификация производилась по амплитудному и локально-динамическому критериям.

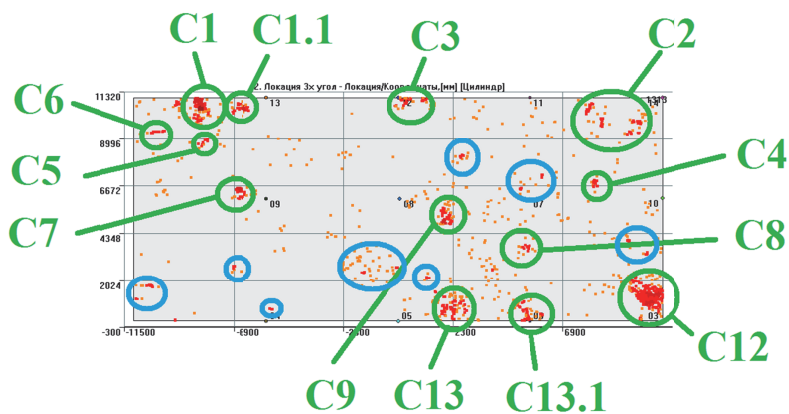


Рис. 2. Локационная карта корпуса камеры коксования в виде развертки ее поверхности

Внутренний осмотр, показал, что из двадцати двух визуально выявленных дефектов (в основном отслоение плакировки) двадцать дефектов соответствовали местоположению источников АЭ. Ниже на рис. 3 представлены фотографии дефектов относительно условных обозначений источников АЭ.

Отслоение плакирующего слоя представляет собой нарушение связи между основным прочным слоем и защитным коррозионностойким слоем. Основными причинами его возникновения являются:

- водородное расслоение;
- разница в коэффициентах теплового расширения;
- дефекты сварки.

Таким образом, причиной такого явления могли стать сразу несколько конкурирующих процессов. Результатом таких воздействий обычно являются скрытая коррозия и образование водородных блистеров, что в конечном итоге приведет к разрушению сосуда. При этом на внешней поверхности камеры такие дефекты не видны.

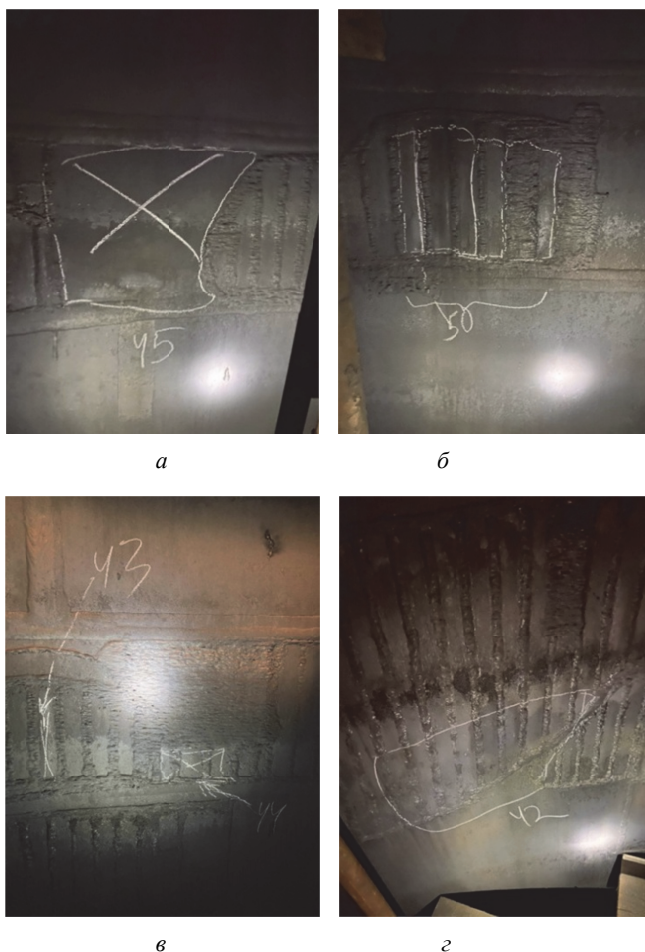


Рис. 3. Фотографии дефектов (отслоения лакирующего слоя), выявленных на корпусе камеры коксования:
а – в зоне С1, С1.1, б – в зоне С3, в – в зоне С4, г – в зоне С5

Несмотря на то, что сам по себе дефект является достаточно распространенным, примечательной особенностью данного случая является его регистрация именно методом акустической эмиссии. Данный метод наиболее эффективен для регистрации активно, а немедленно растущих дефектов (к которым можно отнести отслоение лакировки). Правильная интерпретация полученных от подобных дефектов сигналов весьма затруднительна и требует высокой квалификации оператора.

Объект 2. Нефтегазовый сепаратор

Нефтегазовый сепаратор – это ключевой аппарат, использующийся в нефтепереработке, предназначенный для разделения сырой смеси (нефти, газа и воды) на отдельные фазы. Принцип его работы основан на использовании гравитационных, инерционных и центробежных сил, а также различий в плотности сред. Основные дефекты нефтегазовых сепараторов связаны с коррозионным воздействием среды, абразивным износом и усталостью металла, растрескиванием основного металла и сварных швов, нарушением герметичности фланцевых соединений.

Была выполнена установка 18-ти ПАЭ на поверхность сепаратора (рис. 4).

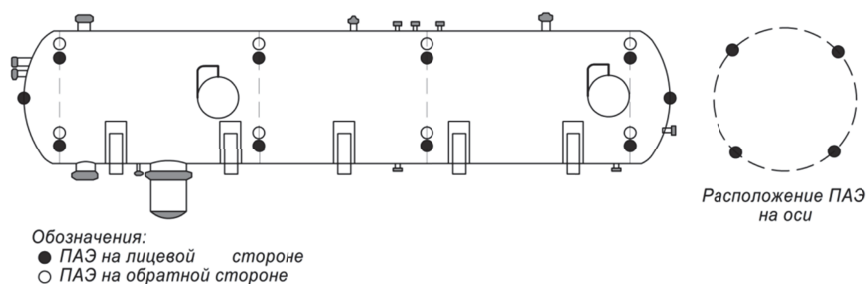


Рис. 4. Места установки ПАЭ на корпусе сепаратора

Сбор данных выполнялся на рабочих значениях технологических параметров. Начальным этапом работ стала оценка акустической активности объекта, с целью выявления концентрации слабых источников АЭ, а также источников помех, шумов и влияния внешних факторов. Локационная карта корпуса сепаратора с указанием зон акустической активности представлена на рис. 5.

Источники АЭ, показанные на рис. 5, были вызваны сильной вибрацией от трубопровода эжектированного потока.

В ходе АЭ-контроля выявлено 3 зоны (обведены контуром зеленого цвета на рис. 6) источников АЭШ класса (активных), получивших развитие в процессе эксплуатации. Также выявлено 4 зоны (обведены контуром синего цвета на рис. 6) источников АЭ I класса (пассивных), расположенных на корпусе сепаратора, не представляющих опасности для его целостности.

В данном случае классификация также производилась по амплитудному и локально-динамическому критериям. Концентрация источников АЭ в указанных зонах незначительна, а проявление их во времени непостоянно, что свидетельствует о медленном развитии дефектов либо несущественности причин, приведших к их возникновению (например, трение берегов расслоения, разовая релаксация напряжений).

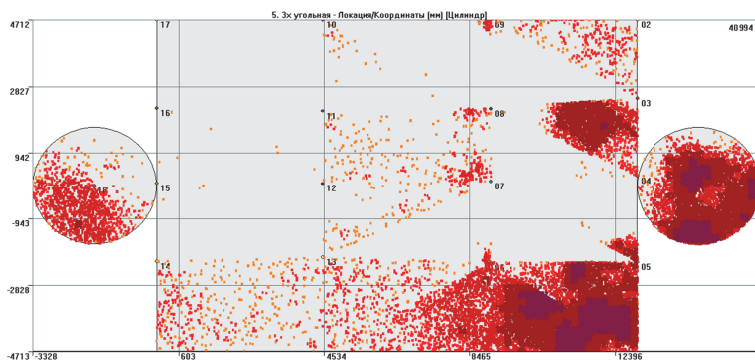
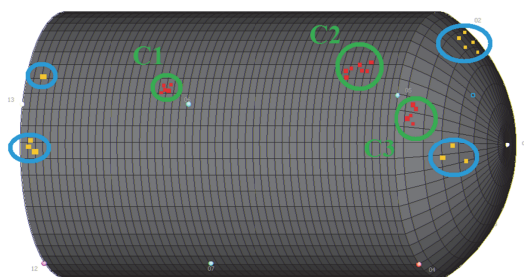
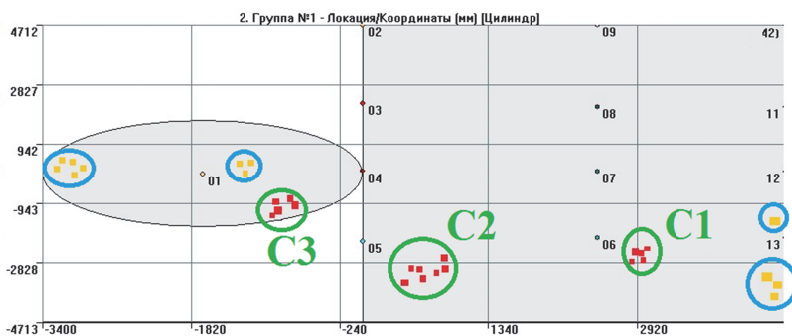


Рис. 5. Локационная карта корпуса с указанием зон акустической активности



a



б

Рис. 6. Локационная карта корпуса сепаратора, в виде объемной модели и развертки ее поверхности с указанием местоположения зон пассивных и активных источников АЭ:

a – локационная карта корпуса сепаратора,
б – локационная карта развертки корпуса сепаратора

Для подтверждения наличия дефектов, обнаруженных в результате АЭ-контроля проводилась дополнительная ультразвуковая толщинометрия (УЗТ) основного металла, показавшая наличие в зоне С1 ранее незарегистрированного расслоения металла, представляющего собой узкую полосу 1 на 4 мм, толщина которой составила 5,9 мм, а в зоне С2 обширное расслоение металла с толщиной 5,7–6,2 мм (рис. 7).

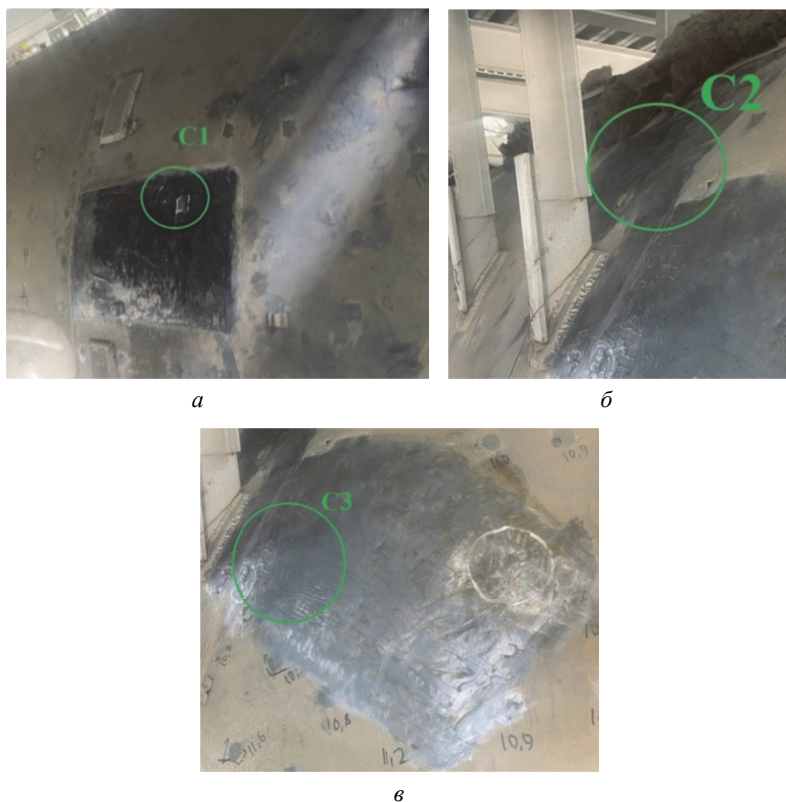
Как уже было сказано выше, расслоение основного металла является распространенной проблемой в оборудовании, рабочая среда которого содержит атомарный водород. Наиболее сложной ситуацией является расслоение, вызванное выделением атомарного водорода в процессе химической реакции при контакте сероводорода с водой (влажный сероводород).



Рис. 7. Расслоение основного металла (блистеринг) корпуса нефтегазового сепаратора

При соединении скопления блистеров трещинами под углом к поверхности может возникнуть внезапное разрушение сосуда. Что примечательно, такой тип дефектов обычно возникает в нижней части сепаратора, где скапливается агрессивная подтоварная вода и на границе раздела сред. На рассмотренном же объекте расслоение произошло в верхней части сепаратора, что не совсем типично.

В зоне С3 обнаружено утонение металла днища до 9,8 мм (при номинальной толщине 12 мм). Днища сосудов являются достаточно уязвимыми зонами, утонение которых в основном связано с эрозией, турбулентностью и скоплениями шламов, а также с напряжениями в зонах сварных швов. Фотографии поверхности сепаратора в местах регистрации зон источников АЭ представлены на рис. 8.



**Рис. 8. Фотографии поверхности сепаратора
в местах регистрации зон источников АЭ:
а – зона C1, б – зона C2, в – зона C3**

Несмотря на то, что в целом блистеринг является достаточно распространенным типом дефектов, специалисты по методу АЭ его наблюдают довольно редко, так как большая часть таких дефектов устраняется на стадиях, предшествующих АЭ-контролю (например, капитальный ремонт), а само обнаружение затруднительно из-за медленного процесса развития дефекта.

Объект 3. Трубопровод блока короткоцикловой адсорбции

Трубопроводы блока короткоцикловой адсорбции (КЦА) являются критическим узлом установок разделения газов (чаще всего для получения водорода высокой чистоты или азота). Общий вид блока КЦА показан на рис. 9.

Их работа характеризуется частыми циклами переключения давления, что определяет специфику их дефектов. Типовыми дефектами являются: усталостное растрескивание, вибрационный износ, нарушение герметичности клапанов, эрозия и засорение адсорбентом, водородная коррозия.



Рис. 9. Общий вид блока КЦА

В процессе работы на поверхность трубопровода была выполнена установка 28 ПАЭ. В ходе АЭ-контроля выявлено 9 сварных соединений с зарегистрированными источниками АЭ II класса (активными), получившими развитие в процессе эксплуатации. На графике, приведенном на рис. 10, представлена информация по амплитудам, регистрируемым на трубопроводе блока КЦА. Выделена зона, свидетельствующая о регистрации сигналов, в период релаксации трубопровода (цикл занимает 8 минут).

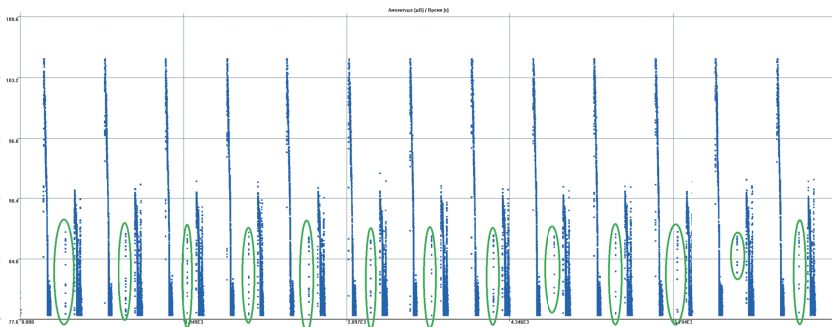


Рис. 10. Зависимость амплитуды импульсов АЭ от времени на наиболее активном канале

Как уже было сказано ранее, большая часть развивающихся дефектов связана с циклическим изменением давления, что хорошо видно на рис. 11.

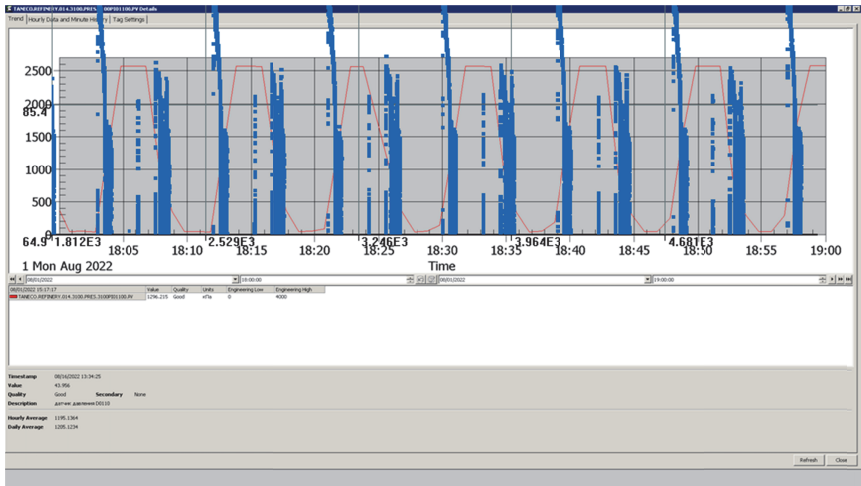


Рис. 11. Взаимосвязь амплитуды импульсов с циклом давления

Причиной подобного поведения явилось нарушение технологии монтажа трубопроводной обвязки КЦА – допущенная несоосность сборки элементов трубопровода, из-за чего возникло критическое напряженно-деформированное состояние, которое усугубилось действием циклических нагрузок в процессе эксплуатации объекта (рис. 12).



Рис. 12. Несоосность частей трубопровода блока КЦА, приведшая к возникновению дефекта

Совокупность данных факторов привела к усталостному эффекту. Регистрация сигналов АЭ в процессе «отдыха» свидетельствует о наличии существенных напряжений, которые приводят к развитию трещины и последующей разгерметизации. По данному параметру и некоторым другим критериям, было проведено ранжирование трубопроводов, а затем, в последующем, проведен ремонт, который подтвердил результаты контроля. Дополнительной особенностью данного объекта является то, что другие виды контроля не способны зарегистрировать данные отклонения, как и дефект шва, в силу конструктивных особенностей (рис. 13).

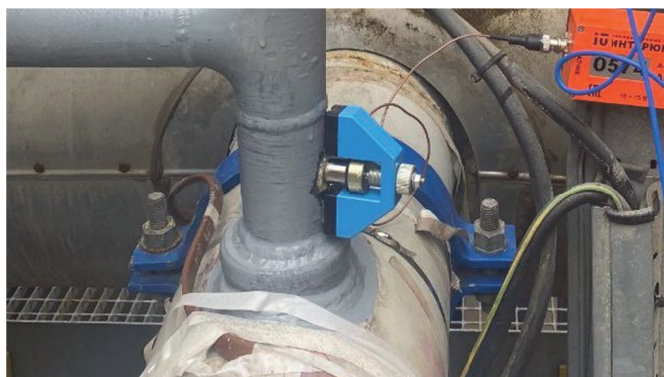


Рис. 13. Внешний вид сварного шва трубопровода блока КЦА, в котором создавались недопустимые напряжения

Вывод

АЭ-контроль является достаточно универсальным методом, который обладает большими возможностями и может быть широко использован для выявления разнообразных типов дефектов. Но в связи с тем, что его используют совместно с другими методами контроля некоторые типы дефектов, являющихся достаточно распространенными для конкретных видов диагностируемого оборудования, на стадии проведения АЭ-контроля встречаются редко, так как выявляются и устраняются на предшествующих этапах.

Также в одних случаях некоторые типы медленно развивающихся дефектов, в связи со спецификой метода, сложно диагностируемы, а в других – вызваны трудно прогнозируемыми причинами, что усложняет интерпретацию данных, полученных в результате проведения АЭ-контроля. Совокупность всех этих факторов приводит к необходимости тщательного анализа объекта АЭ-контроля и обучения персонала для исключения ситуаций, когда дефекты остаются не выявленными.

Список литературы

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Основные требования к проведению неразрушающего контроля технических устройств, зданий и сооружений на опасных производственных объектах», утвержденные приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 01.12.2020 г. № 478.
2. ГОСТ Р 55045-2012. Акустико-эмиссионная диагностика. Термины, определения и обозначения. М.: Стандартинформ, 2019. 16 с.
3. ГОСТ Р 52727-2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2007. 12 с.
4. Требования к акустико-эмиссионной аппаратуре, используемой для контроля опасных производственных объектов (РД 03-299-99). Серия 28. Выпуск 8. М.: Научно-технический центр по безопасности в промышленности, 2009. 32 с.
5. Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов (РД 03-300-99). М.: ПИООБТ, 2002. 30 с.
6. API RP 579-1/ASME FFS-1. Fitness-For-Service (Пригодность к эксплуатации). 3-е изд. Вашингтон: American Petroleum Institute, 2016. 1292 с.
7. API RP 571. Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry (Механизмы повреждения стационарного оборудования в нефтеперерабатывающей промышленности): рекомендованная практика. 3-е изд. Вашингтон: American Petroleum Institute, 2020. 367 с.

УДК 534-16, 539.375.5, 519.248

АЭ-ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ И ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ МАТЕРИАЛОВ

Петерсен Т.Б., Шемякин В.В., Самохвалов А.Б.
ООО «ДИАПАК», Москва, Россия. E-mail: tpetersen@diapac.ru

Рассмотрен способ оценки вероятности отказа объекта при потере прочности с применением метода акустической эмиссии. Показано, что использование полученных показателей вероятности, а также интервалов между соседними по времени АЭ-сигналами могут служить в качестве индикаторов технического состояния материала объекта в процессе нагружения.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, механические испытания, вероятность отказа, пластическая деформация

Введение

Центральной задачей метода акустической эмиссии (АЭ) как метода неразрушающего контроля является определение информативных параметров, создание критериев работоспособности и поврежденности и, в конечном итоге, прогнозирование состояния отказа. Под отказом рассматривается как частичное нарушение работоспособности, так и потеря механической целостности объекта контроля (ОК) и его катастрофическое разрушение.

В 2025 г. был актуализирован документ РБ, в который вошли хорошо известные, а также вновь разработанные критерии опасности. В основе формирования практически всех критериев лежит принцип, в соответствии с которым опасным считается рост показателей АЭ как функции роста поврежденности от времени.

В настоящей работе в продолжение работ по созданию критериев опасности с целью прогнозирования события отказа предложено применить подходы теории надежности, используемые при оценке прочности проектируемых конструкций и объектов. Для демонстрации подхода анализируется функция предельного состояния образца, подвергнутого растяжению. В приведенном примере моделируется производственная ситуация, когда под воздействием нагрузок и агрессивных факторов происходит потеря толщины стенки объекта или образуется трещина и в результате в областях повышенной концентрации напряжений реализуется состояние пластической деформации и последующее снижение прочности.

Целью выполнения расчетов и модельных испытаний является оценка заданного уровня надежности и использования результатов, полученных при испытаниях образцов, для контроля опасных производственных объектов (ОПО) при натурных испытаниях.

Методы исследования и обработки данных

Способ оценки показателей надежности и вероятности отказа апробирован на данных, полученных при механических и АЭ-испытаниях металлических образцов, изготовленных из углеродистой и аустенитной стали, имеющих различную геометрию и исходную степень износа. При этом поскольку режим нагружения является важным фактором, который определяет динамику накопления и роста поврежденности, а также уровень АЭ, все испытанные образцы подвергались одинаковому режиму статического нагружения со скоростью деформации $\dot{\epsilon}$ от 0,5 до 1 мм/мин.

Механические испытания образцов III типа [1] проводили с использованием разрывной 10-тонной машины Инстрон. Одновременно регистрировали акустическую эмиссию с использованием АЭ-системы DISP производства MISTRAS Ltd и широкополосных датчиков типа WD. Полосу пропускания аппаратуры задавали в диапазоне от 100 до 1000 кГц, частоту оцифровки – 2 МГц. При обработке АЭ-данных сигналы подвергали фильтрации по АЭ-параметрам с целью устранения помех; использовали фильтры по следующим показателям: соотношения амплитуда/длительность A/D ; пиковая амплитуда/время нарастания A_p/T_r ; значение пиковой частоты начала сигнала F_i ; число выбросов в сигнале C ; в ряде случаев дополнительно анализировали форму сигнала.

В качестве основных информативных параметров АЭ анализировали скорость изменения суммарной амплитуды сигналов за заданный интервал времени, а также суммарный интервал времени между соседними сигналами/событиями эмиссии. Выбор данных параметров продиктован их связью с механикой разрушения и физикой явления излучения акустических волн при нагружении материалов. Как было показано ранее, при высокочастотной (ВЧ) регистрации, для частот от 100 кГц и выше, амплитуда сигнала является ключевым параметром, содержащем информацию о физических показателях: скачке скорости деформации в источнике излучения волн, а также отчасти энергии, выделившейся в АЭ-источнике. Величина скачка скорости (производная скорости) отвечает за формирование волнового фронта и тем самым определяет уровень регистрируемых АЭ-амплитуд.

Другой используемый параметр, определенный как интервал времени между моментами регистрации соседних по времени сигналов, является показателем, позволяющим судить о свойствах потока сигналов. В частности, экспоненциальное распределения интервалов между соседними сигналами свидетельствует о том, что поток является пуассоновским, что позволяет делать выводы о механизме излучения источников, т. е. принадлежности их к классу независимых источников, например, ускоренному движению/торможению ансамблей дислокаций или помехам.

Для оценки показателей надежности и вероятности отказа в результате активизации механизмов потери толщины, таких как коррозия и/или эрозия, использовали подходы механики, основанные на напряжениях [2, 3]. Для различных состояний материала объекта определяли функцию предельного состояния в виде $G = R - S$, где базовые переменные S и R представляют собой показатель воздействия на ОК и показатель сопротивления материала, соответственно. Переменные сопротивления материала R рассматриваются как случайные величины, вероятностные характеристики которых получены экспериментально; переменные воздействия, $S(t)$ – в виде функций от времени. Значение $G = 0$ данной функции определяет границу между допустимым и недопустимым состояниями.

В случае когда функция предельного состояния принимает отрицательные значения, состояние объекта рассматривается как недопустимое, т. е. отказ. Для оценки функции предельного состояния использовали подход FORM (first order reliability method). В качестве параметров функции предельного состояния, связанных с сопротивлением объекта разрушению, R , использовали статистические значения механических параметров, полученные при испытаниях I и III типов образцов (среднее и СКО условного предела текучести, σ_{02} и предела временного сопротивления, σ_b для нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н10Т и углеродистой стали 20). Параметрами воздействия $S(t)$ служили текущие значения функции нагружения образцов. Максимум скорости суммарной амплитуды АЭ использовали как параметр, который соответствует определенному интервалу значений нагрузки/напряжений.

Были проанализированы три функции предельного состояния: 1) функция $G = 0$ определена как граница между упругим и пластическим состоянием; 2) функция определена для стадии неупругого деформирования и упрочнения, в качестве параметра сопротивления R материала использовали напряжение течения, определяемое как $S = (\sigma_{02} + \sigma_b)/2$, возможность упрочнения металла на данной стадии расширяет область допустимых нагрузок по сравнению с расчетами по допускаемым упругим напряжениям и, в частности, используется при оценке пригодности к эксплуатации объекта; 3) функцию $G = 0$ определяли как границу между упрочненным состоянием и пределом временного сопротивления.

Численные значения надежности получали путем расчета индекса надежности, β , который определяется через вероятность отказа, POF как $\beta = -\Phi^{-1}(POF)$, где Φ^{-1} – инверсия интегральной функции стандартного нормального распределения, в котором в качестве стандартных значений среднего и СКО используются соответствующие механические характеристики анализируемого материала.

Результаты

Для демонстрации результатов, полученных в соответствии с рассмотренным выше подходом, на рис. 1 приведены типичные графики нагружения и вероятности наступления событий отказа в зависимости от времени. Данные получены при испытании образца, выполненного из стали аустенитного класса марки 12X18H10T, предназначенного для применения в высокоагрессивных коррозионных средах при повышенных температурах. Вероятность отказа рассчитана для двух событий: первое – достижение напряжением условного предела текучести; второе – достижение напряжения течения, равного половине суммы σ_{02} и σ_b . Бросается в глаза различие в формах двух функций POF(t) (1 и 2), которое связано не столько с разницей средних значений механических характеристик (напряжений), определяющих параметр R функции предельного состояния, сколько с разбросом значений этих напряжений: для второй функции значение СКО на порядок выше, чем для первой функции. Результаты имеют следующую интерпретацию: больший разброс параметров, являющихся случайными величинами (СВ) и определяющих функцию предельного состояния, определяет меньшее значение вероятности при наступлении события отказа.

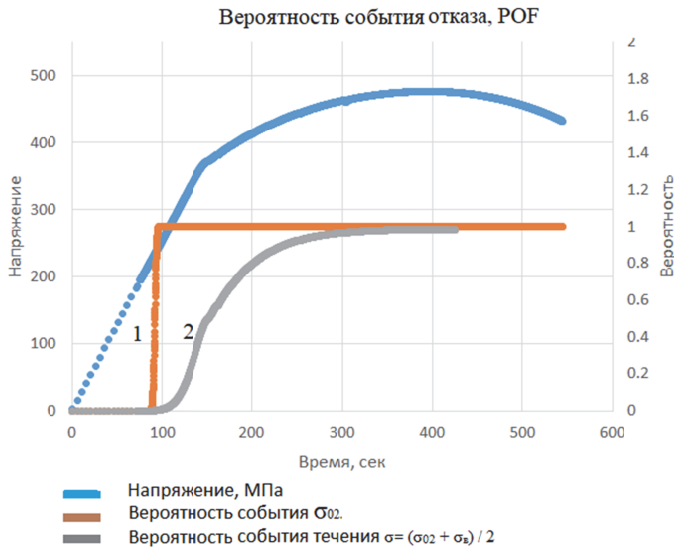


Рис. 1. Графики нагружения и вероятности отказа для образца из нержавеющей стали аустенитного класса 12X18H10T. Кривые вероятности POF рассчитаны для различных событий, определенных с использованием напряжений

На рис. 2 приведены графики нагружения и POF, полученные при испытании образца из углеродистой стали 20. Функция предельного состояния для данного случая была определена как граница между упругой и неупругой областями состояния металла.

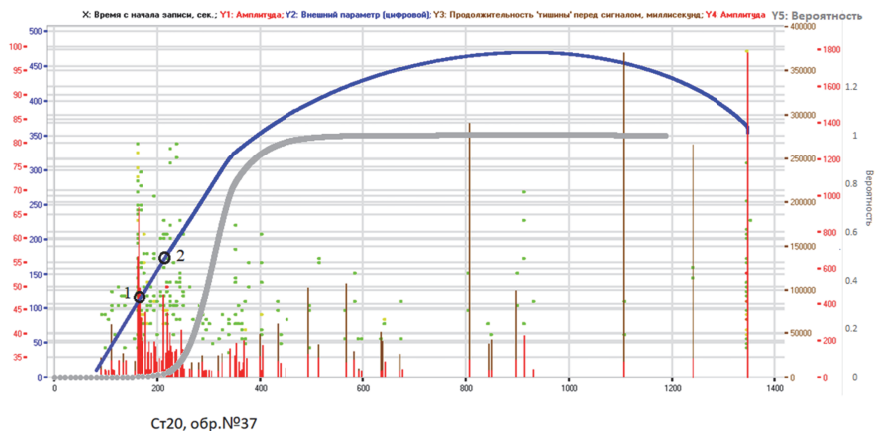


Рис. 2. График вероятности отказа.

Событие отказа определено как достижение значения напряжения течения

Область графика, которая соответствует максимальным значениям скорости суммарной амплитуды АЭ, лежит в диапазоне напряжений 105–215 МПа и относится к линейной части кривой нагружения. Как известно, эта область микротекучести, наблюдаемая при статическом нагружении образцов с постоянной скоростью деформирования, соответствует стадии активизации и выхода на поверхности ансамблей подвижных дислокаций. Также известно, что движение дислокаций с ускорением/торможением является источником волн напряжений, поэтому одновременное ускоренное движение ансамбля вызывает появление значительной АЭ, которую можно наблюдать на рис. 2, 3. Вероятность события отказа, для точек 1 и 2, относящихся к пикам суммарной АЭ-амплитуды на рис. 2 составляет $P_1 = 0,9 \cdot 10^{-3}$ и $P_2 = 2 \cdot 10^{-2}$, соответствующие индексы надежности, $\beta_1 = 3,1096$ и $\beta_2 = 2,039$.

Полученный результат позволяет сделать вывод о том, индекс надежности β_1 удовлетворяет классу безопасности для предельных состояний по несущей способности, для которого минимальное значение индекса составляет $\beta = 3,1$. Это означает, что рассмотренный АЭ-показатель в принципе может применяться в качестве показателя состояния материала ОК при статическом нагружении. При этом отметим,

что поскольку при испытаниях образцов эмиссия регистрируется из области повышенных локальных напряжений, то есть, из середины образца, при натурных испытаниях помимо фильтрации помех должна выполняться локация источников, а оценка показателей надежности/вероятности отказа должна производиться для соответствующего кластера событий АЭ.

Второй параметр АЭ, который использовали при обработке данных и который введен в программу обработки данных наравне с другими традиционными параметрами АЭ, определен как интервал времени между соседними АЭ-сигналами/событиями. Анализ данных для большого количества образцов показал, что изменение во времени суммарной величины интервалов между сигналами является информативным показателем, который совместно с изменением суммарной амплитуды позволяет судить о кинетике процесса разрушения. Для примера, иллюстрирующего данный вывод, приведены графики нагрузки, амплитуды и интервалов между сигналами, полученные при испытаниях двух типов образцов: ДКБ образца, предварительно подвергнутого выдержке в кислом растворе, насыщенном H_2S (в соответствии со стандартом ANSI/NACE TM0284-2016), на рис. 3, а также образца из никеля, имеющего наноструктуру со средним размером частиц 72 нм, на рис. 4.

Отметим, что динамика АЭ-параметров при испытаниях образцов из nano-Ni отличается от аналогичных данных при испытаниях металлов, имеющих кристаллическую структуру, и напротив, имеет сходство с динамикой АЭ-параметров при испытаниях композитных материалов, в том числе, бетонов. При этом существенное увеличение интервалов между соседними сигналами перед окончательным разрушением наблюдается для всех испытанных образцов независимо от структуры материала. Для плоских образцов без инициатора такой рост особенно велик и составляет несколько порядков.

Результаты, полученные для большого числа испытанных материалов, показывают, что данный параметр может служить прогностическим признаком приближающегося отказа и окончательной потере механической прочности. Полученное время прогноза различается в зависимости от степени поврежденности и класса материала: наибольшее время, по которому можно было судить о приближающемся разрушении образца, относится к образцам из углеродистой стали 20, предварительно подвергнутым циклическому нагружению [4]. Наименьшее время прогноза получено при испытаниях исходного неповрежденного образца из аустенитной стали 12X18H10T.

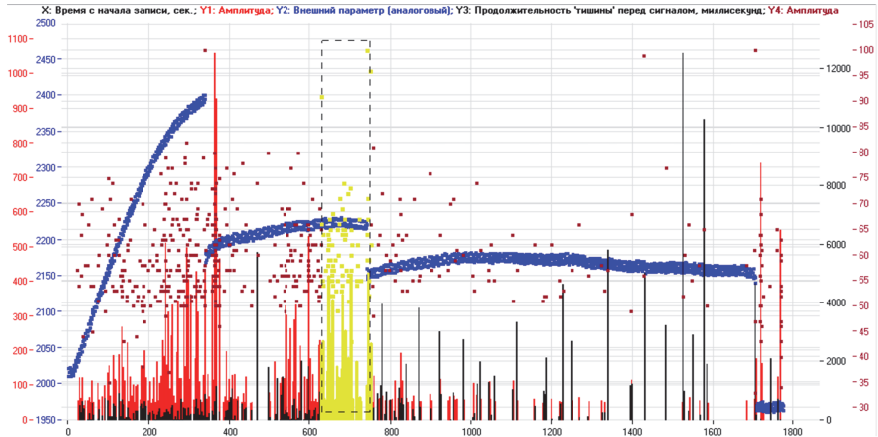


Рис. 3. Нагружение ДКБ образца. Гистограмма интервалов между соседними сигналами от времени представлена черным графиком

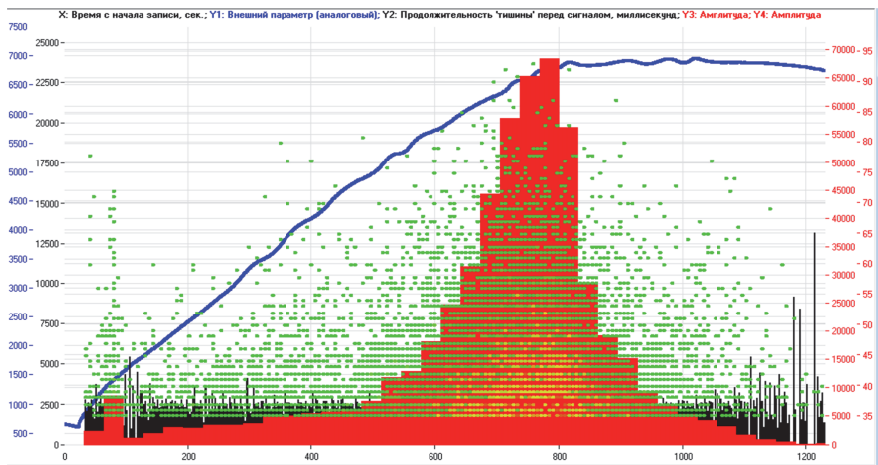


Рис. 4. Нагружение образца из нано-Ni. Графики АЭ-параметров: амплитуда (гистограмма и точный с накоплением от времени) и интервалы между соседними сигналами (гистограмма от времени)

Эффект резкого снижения акустической активности перед разрушением аналогичен часто наблюдаемому эффекту снижения сейсмической активности непосредственно перед главным событием землетрясения, т. е. данный эффект является общим для различных материалов и масштабов разрушения. Эффект связан с тем, что независимо от источника излучения,

развития пластической зоны для плоского образца или роста трещины от инициатора, как, например, при испытании ДКБ-образцов, развитие поврежденности происходит неравномерно путем чередования стадий роста напряжений и последующей релаксации напряжений. На стадии повышения напряжений излучение сигналов связано с множественным срывом с мест закрепления дислокационных ансамблей. Дальнейшее изменение напряжений в процессе деформационного упрочнения может иметь как скачкообразный, так и постепенный характер. При резком падении напряжений, например, при образовании свободных поверхностей при трещинообразовании или разрушении хрупких включений (типа MnS) возникают высокоамплитудные сигналы, уровень которых может достигать 80–90 дБ. При последующей релаксации напряжений и на стадии исчерпания прочности процессы пластической деформации носят относительно медленный и непрерывный характер, что приводит к существенному снижению скорости генерации и уровня АЭ-сигналов. Окончательное разрушение происходит либо в результате потери прочности при разрыве в месте наибольшей потери толщины, либо в результате проскока трещины при достижении ею критического размера. В момент разрушения возникает(ют) сигнал(ы) АЭ высокой амплитуды. Результаты механических испытаний образцов с инициаторами и одновременной регистрацией АЭ в диапазоне частот 100–500 кГц без использования предварительных усилителей показали, что амплитуды сигналов при разрушении образцов составляют 120–130 дБ.

Выводы

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что метод оценки вероятности и надежности, рассмотренный в работе, является полезным инструментом для анализа и оценки состояния нагруженного материала. Показано, что рассчитанный на основе показателей АЭ индекс надежности удовлетворяет классу безопасности для предельных состояний по несущей способности ($\beta > 3,1$). Это означает, что данный АЭ-показатель может применяться в качестве индикатора состояния механической целостности ОК при статическом нагружении, например, в период опрессовки объекта с целью обеспечения безопасности.

На примере испытаний большого числа образцов, различающихся по типам, маркам и классам металлов, а также степени исходной поврежденности материалов показано, что параметр, определяемый как интервал между соседними по времени сигналами, может служить в качестве прогностического признака отказа при потере механической прочности.

Авторы от всего сердца благодарят Л.Р. Ботвину и М.Р. Тютину за предоставление образцов и совместные механические испытания, результаты которых были использованы при анализе.

Список литературы

1. ГОСТ 25.502-79. Методы испытаний на усталость. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов.
2. Risk-Based Inspection Methodology. API Recommended Practice 581. Fourth Edition, January 2025.
3. ГОСТ Р ИСО 2394-2016. Конструкции строительные. Основные принципы надежности (ISO 2394:1998, General principles on reliability for structures, IDT). Москва: Стандартинформ 2016.
4. Ботвина, Л.Р. Акустическое затишение как диагностический признак предразрушения / Л.Р. Ботвина, Т.Б. Петерсен, М.Р. Тютин // ДАН. 2018. Т. 479. № 5. С. 514–518.

УДК 620.179.171.14

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛА ПРИ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ

Пащыков А.1, Скаженюк В.И.2

¹Международный университет нефти и газа имени Ягшигельды Какаева, Ашхабад, Туркменистан. E-mail: arslanpassykov5@gmail.com

²НИИ природного газа ГК «Туркменгаз», Ашхабад, Туркменистан. E-mail: s.valeriy59@gmail.com

Цель работы – сравнить возможности методов акустической эмиссии (АЭ) и магнитной памяти металла (МПМ) при НК сосудов давления. Расположение обнаруженных источников акустической эмиссии и зон концентрации магнитных напряжений (ЗКН), выявленных методом МПМ на корпусе сосуда, хорошо совпадало между собой с точностью 0,2–0,5 м. Совместное использование методов АЭ и МПМ позволяет наиболее точно определить местонахождение развивающихся дефектов.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, метод магнитной памяти металла, локация, зона концентрации напряжений, дефект

Известно, что акустико-эмиссионный (АЭ) метод относится к методам неразрушающего контроля и диагностики, позволяющий выявлять активные развивающиеся образования, такие как процессы пластической деформации, собственно разрушения и фазовые переходы [1, 2]. Метод АЭ, в отличие от большинства методов НК, является пассивным, т. е. источником звуковых сигналов служат напряженно-деформированные участки самого материала.

По типу обнаруживаемых дефектов и характеру использования свойств исследуемого объекта лишь метод магнитной памяти металла (МПМ) очень похож на метод АЭ. Методу МПМ не требуется дополнительное намагничивание объекта контроля. Он основан на регистрации собственного магнитного поля рассеяния металла объекта в магнитном поле Земли при сканировании его поверхности специальным феррозондовым преобразователем. Участки с резким изменением напряженности и, соответственно, высоким градиентом магнитного поля, характеризуются напряженно-деформированным состоянием, вызванным наличием развивающихся дефектов с высоким коэффициентом концентрации напряжений, процессами пластической деформации и др. [3].

Цель данной работы – сравнить возможности методов акустической эмиссии и магнитной памяти металла (МПМ) при обследовании одного и того же объекта. Для обследования был выбран сосуд давления абсорбер

очистки газа высотой 16 м, внутренним диаметром 3400 мм и толщиной стенки 110 мм.

При диагностическом контроле абсорбера методом АЭ использовался прибор К-740 с 16 акусто-эмиссионными преобразователями, равномерно расположенными по всей внешней поверхности сосуда. Во время гидроиспытаний давления повышалось до значения, на 25 % превышающего паспортное рабочее давление. По результатам АЭ-контроля зарегистрирована 21 локация, квалифицированная как источники I класса (пассивные) и источники II класса (активные) в соответствии с нормативными документами [4]. Пассивные источники (5 шт.) располагались в нижней части абсорбера на высоте 1–4 м, в то время как активные источники в количестве 16 шт. группировались в верхней части на высоте 12–16 м (рис. 1).

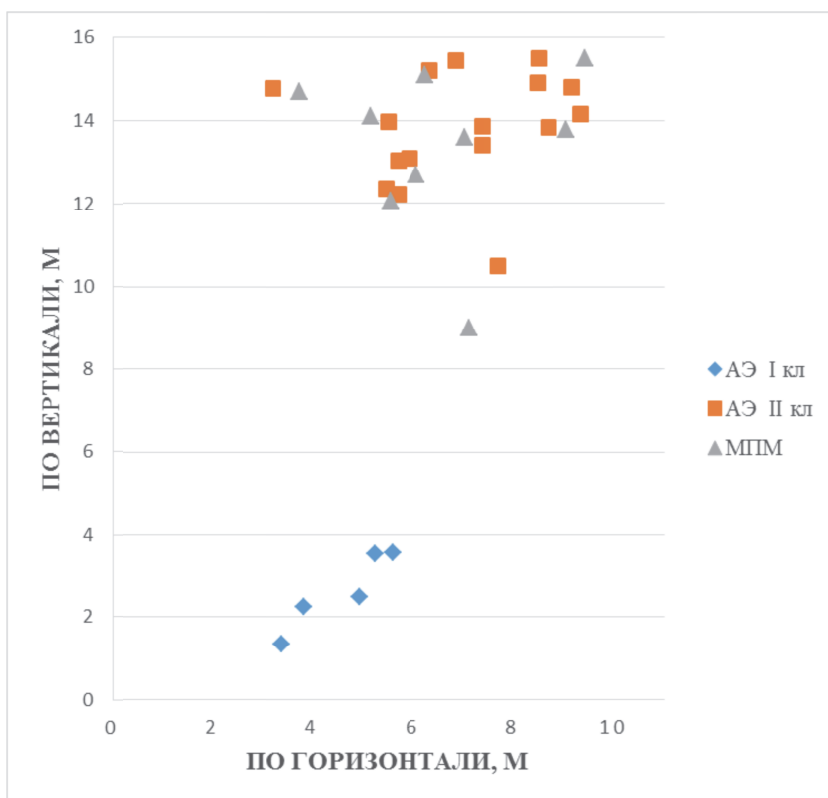


Рис. 1. Развертка абсорбера очистки газа с указанием расположения локаций источников АЭ I и II классов, а также зон концентрации напряжений, обнаруженных методом магнитной памяти металла

При контроле абсорбера методом магнитной памяти металла использовался прибор ИКН-3М-12 с 4-мя феррозондовыми преобразователями, каждый из которых регистрировал нормальную и тангенциальную составляющие магнитного поля рассеяния при сканировании поверхности сосуда давления. Места сосуда с резким изменением напряженности и, соответственно, высоким градиентом магнитного поля (более 10 (А/м)/мм) образуют так называемые зоны концентрации напряжений (ЗКН), одной из причин появления которых является наличие дефекта металла. По результатам обследования абсорбера методом МПМ обнаружено 9 ЗКН с градиентом магнитного поля, превышающим минимальный уровень 10 (А/м)/мм, начиная с которого зона напряжений может квалифицироваться как дефект металла. Восемь из обнаруженных аномальных зон магнитного поля находились на трех верхних обечайках абсорбера на высоте 11–15,5 м, одна ЗКН располагалась ниже на высоте 9 м. В нижней части абсорбера зон концентрации напряжений обнаружено не было (см. рис. 1).

Как видно из рис. 1, источники акустической эмиссии II класса и зоны концентрации напряжений, обнаруженные методом МПМ, по своему расположению на корпусе абсорбера очень близки между собой. Относительная ошибка расположения локаций и ЗКН, в основном, составляет значения 0,2–0,5 м. Паспортная точность определения координат локаций прибором К-740 составляет $\pm 0,3$ м. В некоторых случаях при наличии АЭ-источников зоны концентрации напряжений не проявляются.

Связь источников акустической эмиссии I класса и зон концентрации напряжений не прослеживается.

Примеры некоторых зон концентрации напряжений, обнаруженных прибором магнитной памяти металла ИКН-3М-12, отражены на рис. 2.

В верхней части каждой магнитограммы представлены кривые напряженности магнитного поля рассеяния H_p для нормальной и тангенциальной составляющих по 4 датчикам. В зонах концентрации напряжений монотонный ход напряженности магнитного поля сменяется резкими колебаниями, что свидетельствует о наличии какого-то дефекта.

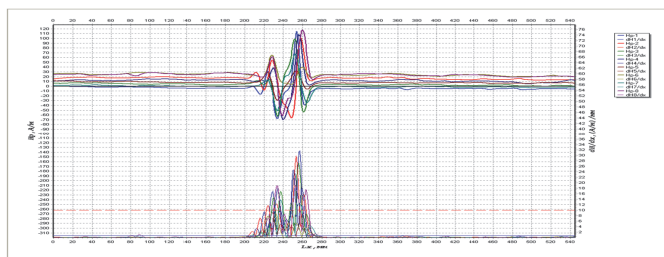
В нижней части магнитограмм приведены градиенты напряженности магнитного поля для каждого из каналов двухкомпонентного датчика. Результирующий градиент магнитного поля G вычисляется с помощью специализированной программы по формуле

$$G = \sqrt{\left(\frac{dH_x}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dH_y}{dx}\right)^2},$$

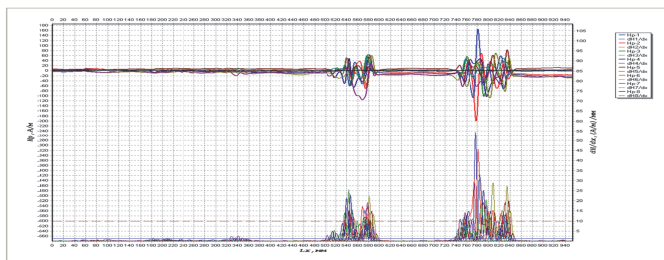
где x – направление сканирования датчиком;

H_x – продольная составляющая магнитного поля (вдоль направления сканирования);

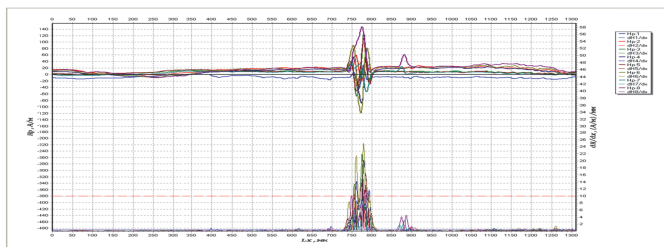
H_y – нормальная составляющая магнитного поля (перпендикулярно вверх от линии сканирования).



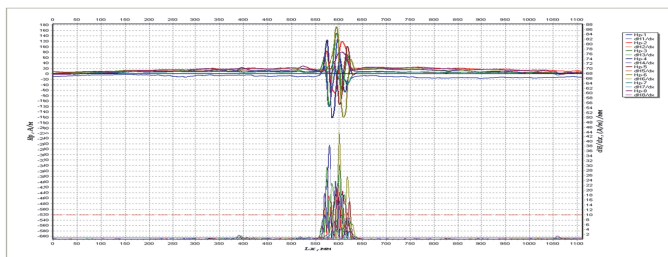
a



b



c



d

Рис. 2. Некоторые магнитограммы зон концентрации напряжений абсорбера очистки газа: *a, b* – верхняя обечайка; *c, d* – вторая сверху обечайка

Значения градиента магнитного поля рассеяния в обнаруженных зонах концентрации напряжений на корпусе абсорбера составили значения 25–55 (А/м)/мм.

Как видно на карте локации (см. рис. 1) зоны повышенной концентрации индикаций АЭ располагаются на верхних обечайках абсорбера. Эти обечайки были обследованы с помощью ультразвукового дефектоскопа USM25S и ультразвуковой компьютерной системы ISONIC 2001.

По результатам обследования было обнаружено наличие большого числа несплошностей в виде включений внутри стенки указанных обечаек. При этом на верхней обечайке количество включений в несколько раз превышало количество несплошностей на соседней снизу обечайке. Это наглядно видно на рис. 3, где представлены результаты сканирования участков верхних обечаек с помощью прибора ISONIC 2001.

Обнаружить источники акустической эмиссии с помощью ультразвукового метода было очень затруднительно по причине сильной засоренности металла включениями и малыми размерами источников эмиссии. На рис. 3, *a* представлен участок верхней обечайки, где, предположительно, находится источник АЭ в виде объединения нескольких включений (указан стрелкой).

На другом участке верхней обечайки, где нет источников эмиссии, похожих образований не наблюдается (рис. 3, *b*).

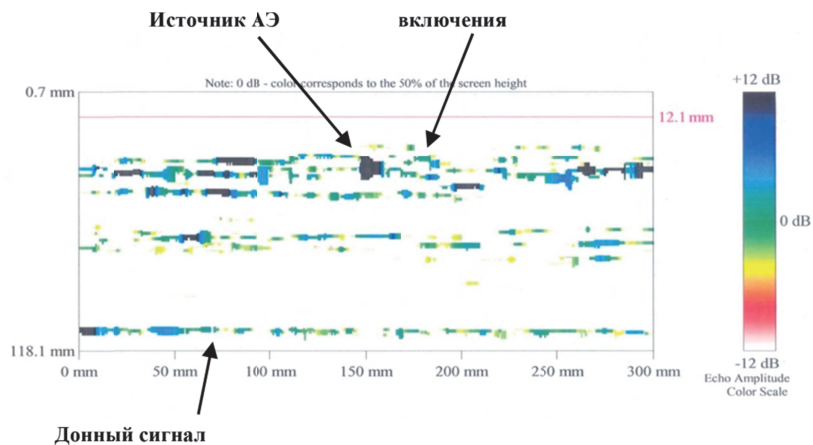
На соседней снизу обечайке количество включений значительно меньше (рис. 3, *c*) по сравнению с верхней обечайкой.

Количество источников акустической эмиссии на верхней обечайке (10 шт.) также превосходило количество источников АЭ на соседней снизу обечайке (5 шт.). Сопоставив данные по локации источников АЭ с данными ультразвуковых измерений, напрашивается вывод о прямой зависимости количества источников эмиссии от степени засоренности металла несплошностями в виде включений.

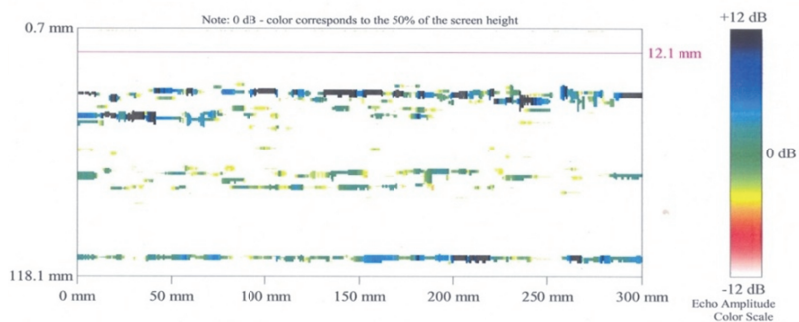
Предположительно, источниками акустической эмиссии могут быть микротрещины и микрорасслоения, возникающие в местах скопления включений, характеризующихся высоким коэффициентом напряжений, при малоцикловом нагружении сосуда давления в течение длительной эксплуатации. Эти процессы могут привести к объединению включений и трансформации микротрещин в макротрещину.

С помощью АРД-диаграмм (амплитуда-расстояние-диаметр), встроенных в память ультразвукового дефектоскопа USM25S, была сделана оценка эквивалентных размеров включений в металле обследованного абсорбера. Большинство несплошностей имели эквивалентные размеры от 2,5 мм до 4 мм (рис. 4).

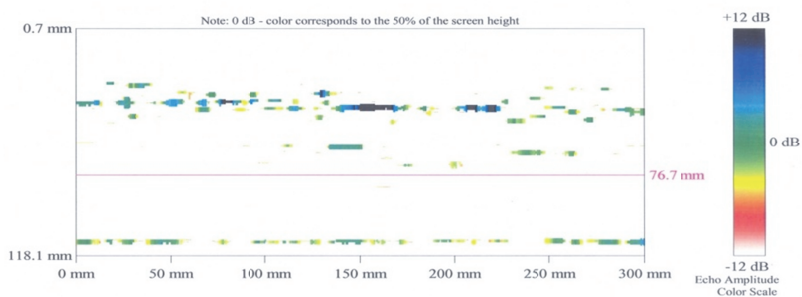
Ультразвуковой мониторинг в течение длительного времени не выявил изменений в размерах включений. Источниками АЭ, как было сказано выше, могут быть микротрещины, соединяющие близкорасположенные несплошности в зонах пластической деформации.



a



b



c

Рис. 3. Ультразвуковые В-сканы участков поверхности абсорбера очистки природного газа: *a, b* – верхняя обечайка; *c* – вторая сверху обечайка

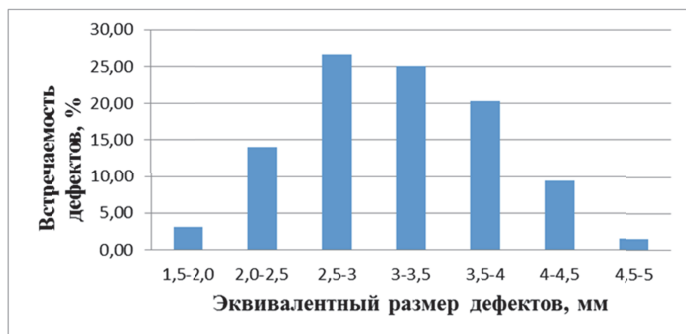


Рис. 4. Распределение включений по эквивалентным размерам на верхней обечайке абсорбера очистки природного газа

Сопоставление параметров обнаруженных источников акустической эмиссии (амплитуда сигналов АЭ, темп генерации импульсов, энергия импульсов АЭ) с величиной градиента напряженности магнитного поля рассеяния по методу МПМ проведен не был по причине малозначимости статистического материала.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Методы акустико-эмиссионного контроля и магнитной памяти металла, относящиеся к экспресс-методам неразрушающего контроля и диагностики, регистрируют только развивающиеся дефекты.

Расположение на объекте контроля источников акустической эмиссии и зон концентрации напряжений, выявленных методом магнитной памяти металла, практически совпало с ошибкой локализации 0,2–0,5 м.

Все пассивные источники акустической эмиссии I класса, а также некоторые активные АЭ-источники II класса методом МПМ не были зарегистрированы.

Активные источники акустической эмиссии и зоны концентрации напряжений располагались в тех местах объекта, где присутствовали многочисленные инородные включения в металле стенки корпуса. Появление микротрещин между близкорасположенными включениями вследствие длительной эксплуатации объекта и было зафиксировано методами АЭ и МПМ.

Таким образом, экспериментально доказано, что совместное использование методов акустической эмиссии и магнитной памяти металла позволяет наиболее точно определить местонахождение развивающихся дефектов металла. Такой комплексный подход имеет перспективы в области неразрушающего контроля сосудов давления.

Список литературы

1. Поллок, А. Акустико-эмиссионный контроль / А. Поллок // Металлы. Т. 17. ASM International. 1989. С. 278–294.
2. ГОСТ Р 52727-2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования.
3. Власов, В.Т. Физические основы метода магнитной памяти металла / В.Т. Власов, А.А. Дубов. М.: Издательство ЗАО «ТИССО», 2004. 424 с.
4. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.

УДК 534.231.3, 534.6.08, 620.179.16

ЧАСТОТНО-ШУМОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Шелобков В.И., Мусатов В.В., Сазонов А.А., Иванов В.И.
Закрытое акционерное общество "ГИАП-ДИСТцентр", Москва, Россия.
E-mail: shelobkovvi@giapdc.ru

Рассмотрены различные схемы измерения собственных тепловых шумов пьезоэлементов и пьезопреобразователей. Показаны: зависимость шумовых характеристик от геометрии пьезоэлектрических элементов (ПЭП), взаимосвязь шумовой характеристики и импеданса пьезоэлементов. Данный метод, в котором используются собственные тепловые шумы преобразователей позволяет существенно упростить процесс определения параметров ПЭП и увеличить точность измерения электрических параметров пьезопреобразователей. Представлена возможность использования шумовой характеристики при проектировании пьезопреобразователей с требуемыми характеристиками для использования в различных видах контроля и диагностики.

Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь, тепловые шумы, параметры преобразователя, шумовая характеристика

Введение

Пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) нашли широкое применение в научных исследованиях и в промышленности. Они применяются при измерении механических и акустических параметров (перемещения, скорости и ускорения частиц среды), усилий, давления и т. д. [1]. Применяемые схемы определения параметров преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) весьма сложны и не обладают достаточной точностью для оценки некоторых основных параметров ПАЭ, таких как резонансная и антирезонансная частота и других.

Для упрощения процедуры измерения параметров ПАЭ предложено его возбуждение осуществлять с использованием собственного теплового шума, сигнал которого является белым шумом в диапазоне частот от десятков кГц до нескольких МГц. Регистрируют шумовой сигнал на выходе ПАЭ, в параметрах которого содержатся параметры пьезопреобразователя.

Применение шумовой характеристики

В рассмотренной общепринятой эквивалентной электрической схеме пьезоэлемента [2], C_0 – собственная емкость пьезоэлемента (которую можно измерить на частотах существенно меньших резонансной частоты), L_1 , C_1 , R_1 – динамические индуктивная, емкостная и активная составляющие импеданса пьезоэлемента. Входящее в эквивалентную схему активное

динамическое сопротивление R_1 , создает электрический сигнал шумов, значение напряжения которого U задается формулой Найквиста:

$$U^2 = 4kTR_1\Delta f, \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура окружающей среды;

Δf – полоса анализа селективного вольтметра, используемого для измерения собственных тепловых шумов ПАЭ.

В соответствии с патентом [3] авторами был реализован способ определения параметров пьезоэлементов и пьезопреобразователей с использованием их собственных тепловых шумов [4].

При измерениях использовались различные схемы (применяя различные измерительные приборы), в частности, Схема № 1 (рис. 1) и Схема № 2 (рис. 2).

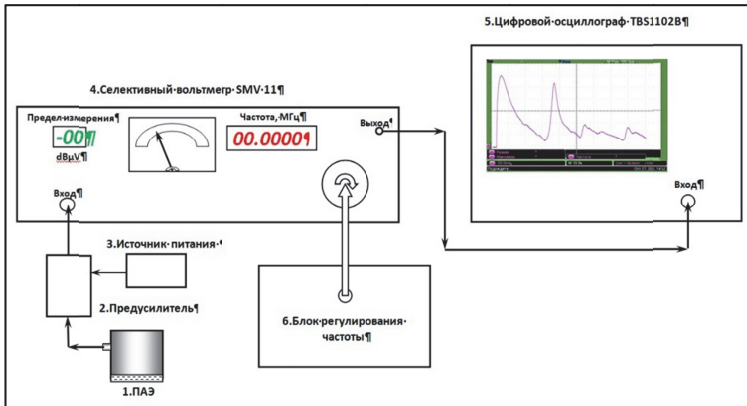


Рис. 1. Схема № 1 измерения шумовых характеристик ПАЭ



Рис. 2. Схема № 2 измерения шумовых характеристик ПАЭ

На рис. 3 представлены частотные зависимости напряжения собственных тепловых шумов промышленного ПАЭ модели GT200 зав. № 8318 (ПЭ – диск 12×5 мм) полученные при использовании разных измерительных схем.

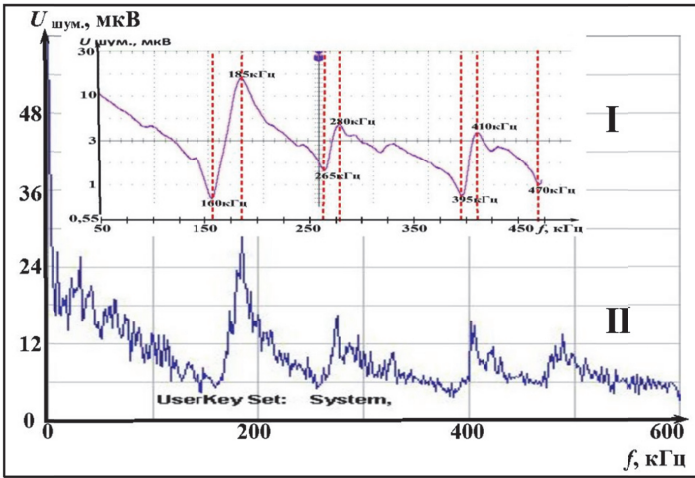


Рис. 3. Частотная зависимость напряжения шумов ПАЭ GT200 зав. № 8318 (ПЭ – диск 12×5 мм) по схемам измерения № 1 (I) и № 2 (II)

Характер кривых для обеих схем измерения одинаковый. Возможная причина изрезанности кривых по второй схеме измерений – более узкая полоса анализа (100 Гц – Схема № 2 и 1,7 кГц – Схема № 1).

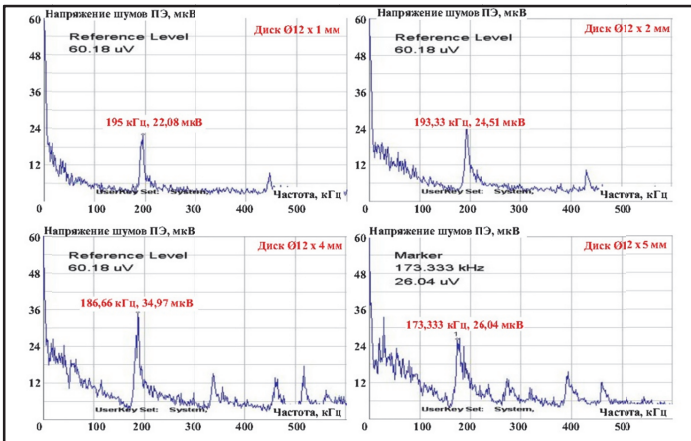


Рис. 4. Частотные зависимости напряжения шума пьезодисков ЦТС-19 диаметром 12 мм, толщиной 1, 2, 4, 5 мм (схема измерения № 2)

Зарегистрированные частотные зависимости шумовых характеристик пьезоэлементов (ПЭ) и количественные оценки, подтверждают (рис. 4), что ярко выраженные значения первой пары частот резонанса и антирезонанса, связаны с радиальным размером диска (Схема измерений № 2. Диски ЦТС-19 диаметром 12 мм, толщиной 1, 2, 4, 5 мм).

Ниже приведены результаты экспериментов по регистрации шумовой характеристики для пьезоэлементов различных геометрических размеров (рис. 5, 6).

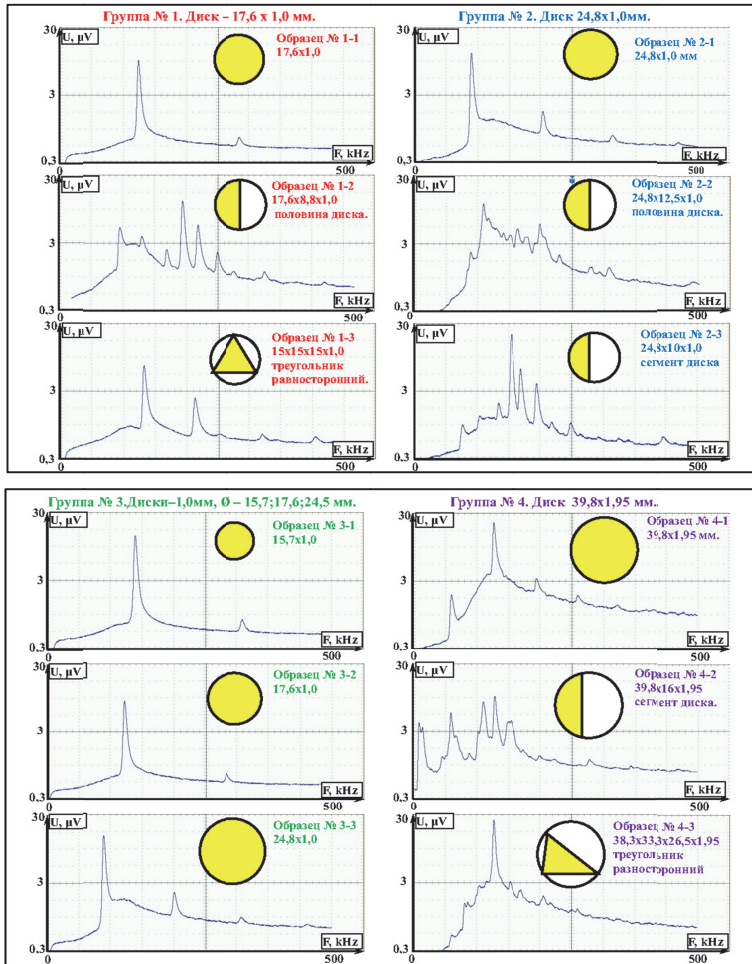


Рис. 5. Графики изменения напряжения шумов для разных геометрий дисков ПЭ

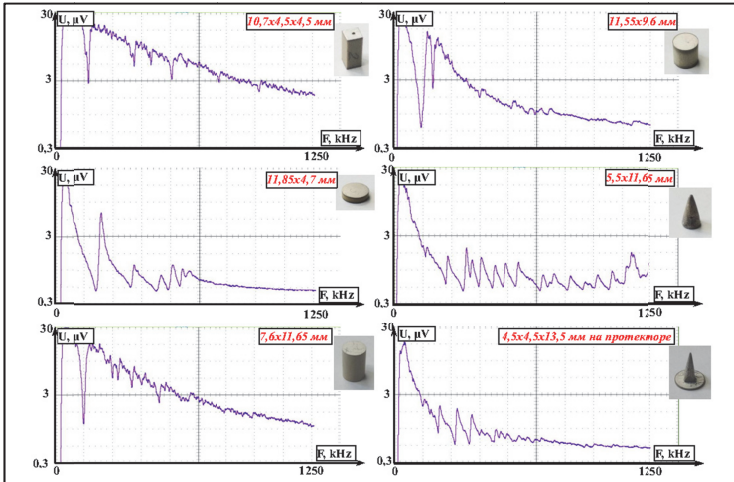


Рис. 6. Графики изменения напряжения шумов для разных геометрий ПЭ

Используя шумовую характеристику, есть возможность по геометрии пьезоэлемента спроектировать пьезопреобразователь с нужными параметрами (резонансная-антирезонансная частота, полоса рабочих частот, требования по демпфированию и т. д.).

Для подтверждения связи теплового шума ПЭ и его импеданса были сняты токовые характеристики тех же пьезоэлементов (Схема № 3, рис. 7).

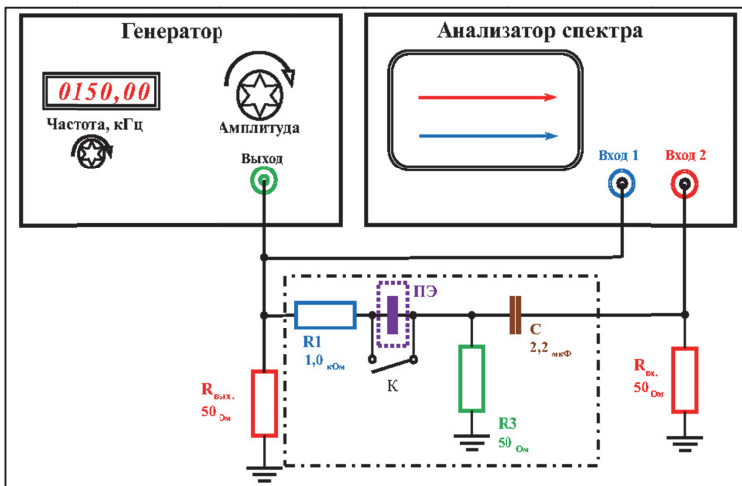


Рис. 7. Схема № 3 измерения тока через ПЭ (для расчета импеданса)

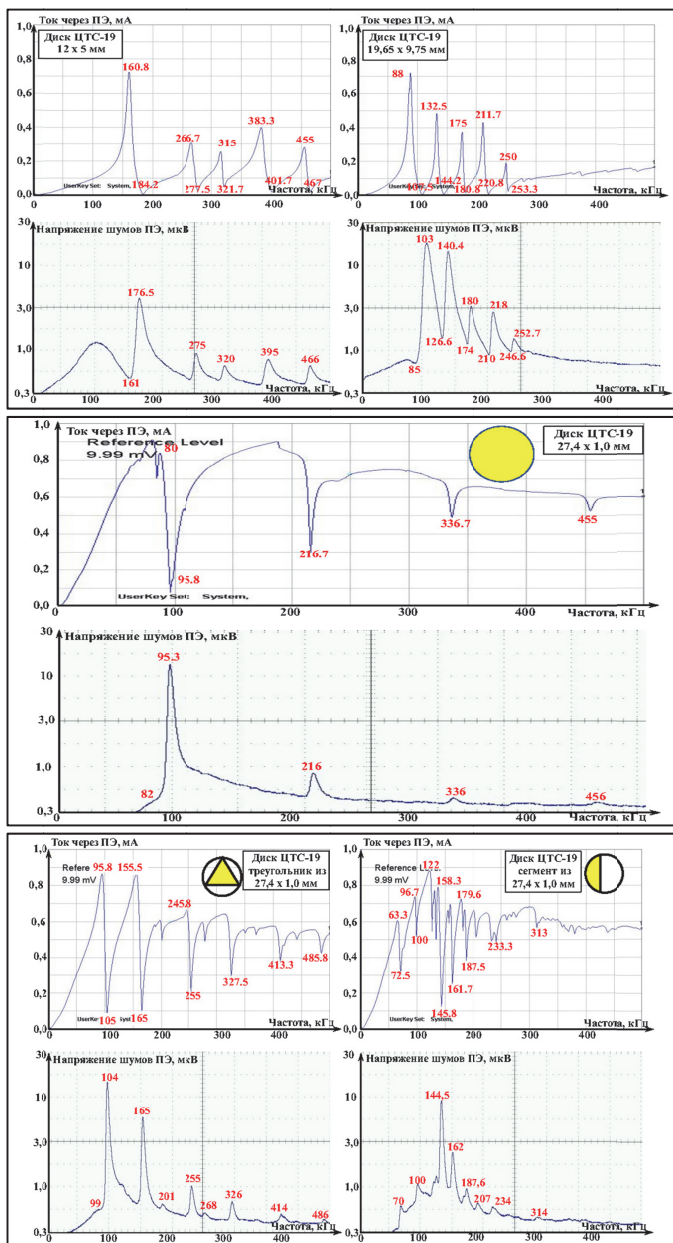


Рис. 8. Графики изменения напряжения шумов и токов через ПЭ

Также был приведен расчет комплексного сопротивления (импеданса) для этих ПЭ для резонансной и антирезонансной частоты (рис. 8, таблица).

Расчет импедансов различных ПЭ

Дано: $U_{\text{вых}} = 2 \text{ В}$. $R1 = 1 \text{ кОм}$. $R3 = 50 \text{ Ом}$. $C = 2,2 \text{ мкФ}$.

Резонансные и антирезонансные частоты измерены с помощью анализатора спектра.

Ток через цепочку $R1$, ПЭ, C , $R3$, $R_{\text{вх}}$ равен $I_{\text{ц2}} = U_{\text{вх.2}} / R3 \parallel R_{\text{вх}}$.

Сопротивление цепочки $R1$, ПЭ, C , $R3 \parallel R_{\text{вх}}$ равно $R_{\text{ц}} = U_{\text{вх.1}} / I_{\text{ц2}}$.

Сопротивление ПЭ равно $R_{\text{ПЭ}} = R_{\text{ц}} - (R1 + R3 \parallel R_{\text{вх}})$.

Расчет комплексного сопротивления (импеданса)

№ п/п	Размер, мм	$F_{\text{рез.}}$ кГц	Напряж. на R3 на $F_{\text{рез.}}$ мВ	Ток на R3 на $F_{\text{рез.}}$ мА	Импеданс ПЭ на $F_{\text{рез.}}$ Ом	$F_{\text{ан-рез.}}$ кГц	Напряжение на R3 на $F_{\text{ан-рез.}}$ мВ	Ток на R3 на $F_{\text{ан-рез.}}$ мА	Импеданс ПЭ на $F_{\text{ан-рез.}}$ кОм
1	12,0 x 2,0	174	46,0	0,92	37	199	1,2	0,024	41,617
2	12,0 x 5,0	161	41,2	0,824	163,6	185	0,72	0,0144	68,394
3	15,7 x 1,0	127	46,9	0,938	16,1	145	3,05	0,061	15,343
4	17,7 x 2,0	115	46,7	0,934	20,7	133	1,77	0,0354	27,198
5	21,6 x 3,95	91	46,1	0,922	34,6	109	0,915	0,0183	53,595
6	Δ 17,75 x 1,0	133	44,9	0,898	63,6	141	5,48	0,1096	8,074
7	14,8 x 5,5	172	45,0	0,9	61	182	0,9	0,018	54,506

Заключение

Представленный метод позволяет измерять с высокой точностью параметры ПЭП, проводить проектирование пьезопреобразователей с требуемыми характеристиками, проводить оценку качества пьезоэлементов при их изготовлении, отбор пьезоэлементов для непосредственного изготовления преобразователей, используемых в различных областях, выбирать близкие по параметрам преобразователи при их использовании в антенных решетках в процессе проведения акустико-эмиссионного диагностирования и УЗК. Появляется также возможность выявить (оценить) изменение параметров пьезопреобразователей в зависимости от конструкции преобразователя и условий применения при диагностировании различных технических устройств в процессе их работы. Можно оценивать влияние контролируемого объекта на изменение параметров ПЭП.

Предложенная методика расчета и измерения параметров пьезоэлектрических преобразователей существенно расширяет возможности получения дополнительной информации об этих устройствах по сравнению с известными методами [5].

Список литературы

1. Шарапов, В.М. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарапова. М.: ЗАО РИЦ Техносфера, 2006. 632 с.
2. Кэди, У. Пьезоэлектричество и его практическое применение / У. Кэди. М.: Изд. Ин. лит., 1949. 718 с.
3. Пат. 2829570 С1 Российская Федерация, МПК G01H 1/06. Способ измерения электрических параметров пьезоэлектрических преобразователей / В.И. Иванов, В.И. Шелобков, В.В. Мусатов, А.А. Сазонов; заявитель Закрытое акционерное общество «ГИАП-ДИСТцентр»; № 2023121994; заявл. 22.08.2023; опубл. 31.10.2024.
4. Определение параметров пьезопреобразователей с использованием их собственных тепловых шумов / В.И. Шелобков, В.В. Мусатов, А.А. Сазонов, В.И. Иванов // Контроль. Диагностика (в печати).
5. Иванов, В.И. Расчет электрического импеданса пьезопреобразователя с учетом внутренних потерь / В.И. Иванов // Дефектоскопия. 1976. № 2. С. 7–13.

УДК 620.179.17

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСУДА С ВНУТРЕННЕЙ ФУТЕРОВОЙ В АО «МАХАМ-ЧИРЧИҚ» ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

Нуриллаев Н.Ш.

АО «Махам-Чирчиқ», Чирчик, Узбекистан. E-mail: info@maxam-chirchiq.uz

На производстве карбамида на находившемся в консервации сосуде с внутренней футеровкой (колонне синтеза) при приближении технологических параметров к рабочим регистрировалась утечка рабочей среды. Было решено провести АЭ-контроль с нагружением до рабочего давления водой при +85 °С. В нижней части объекта были зарегистрированы источники АЭ, которые были подтверждены капиллярным методом контроля.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, колонна синтеза, внутренняя футеровка, утечка рабочей среды, капиллярный метод контроля

АО «Махам-Чирчиқ» является одним из крупнейших предприятий химической промышленности Республики Узбекистан. Освоение метода акустической эмиссии (АЭ) на предприятии началось в 2005 году под руководством начальника Технического Центра Песля В.А. Основной целью при освоении и внедрении метода АЭ-контроля являлось проведение освидетельствования объектов, отработавших свой нормативный срок службы, который составляет 40–70 лет и более.

В 2025 г. руководством предприятия была поставлена задача провести на производстве карбамида контроль находившегося в течение 4 лет в консервации сосуда с внутренней футеровкой – колонны (реактора) синтеза С-303 (см. таблицу). Необходимо было найти дефект, который проявлялся при давлении свыше 100 кгс/см² и температуре +100 °С на внутренней футеровке. В момент достижения указанных параметров датчики технологического контроля регистрировали утечку рабочей среды. Сначала был проведен контроль капиллярным методом, но дефекты не были обнаружены. Тогда было принято решение применить метод АЭ-контроля.

Объект имеет следующие особенности (рис. 1). Корпус находится под изоляцией. Имеется зазор между корпусом и футеровкой, составляющий в рабочем режиме от 0 до 0,5 мм, а в нерабочем режиме от 0 до 2,0 мм. Верхняя крышка крепится к колонне с помощью 16 шпилек. Между верхней крышкой и корпусом находится алюминиевая уплотнительная прокладка.

Колонна синтеза С-303. Данные объекта

Год выпуска	1969
Завод-изготовитель	Кротовопольский машзавод, ЧССР
Зав. №	18689
Материал	корпус N1A(Ст20) футеровка X17H16M3T
Высота	$L = 24000$ мм
Диаметр	$\varnothing_{(внутр)} = 1310$ мм $\varnothing_{(наруж)} = 1520$ мм
Толщина	корпус $S = 110$ мм футеровка $S = 5,0 / 8,0$ мм
Рабочая среда	аммиак, CO_2 , мочеви́на (корроз-я)
Рабочая температура	+200 °С
Рабочее давление	200 кгс/см ²

Чтобы решить, как проводить нагружение, как устанавливать ПАЭ, какой тип локации применять, мы обратились за консультацией к коллегам из ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ», ООО НТЦ «Эгида» и НУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Баумана. Посоветовавшись, мы приняли решение проводить нагружение до давления, равного рабочему, ПАЭ устанавливать на волноводы длиной 300 мм. Из нескольких разработанных схем локации была выбрана цилиндрическая, включающая 14 ПАЭ в 6 поясах: 1 пояс из 3 ПАЭ по периметру верхнего днища, прикрепленного при помощи шпилек, 4 пояса по 2 ПАЭ на цилиндрической части и 1 пояс из 3 ПАЭ по границе цилиндрической части и приварного нижнего днища.

В связи с отсутствием доступа к внутренней части шпилек и к поверхности уплотнительной прокладки остались нерешенными вопросы организации проведения их АЭ-контроля, такие как установка ПАЭ, выбор схемы локации, выявление течей в зоне уплотнительной прокладки.

Использовались АЭ-система A-Line PCI (ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ») и ПАЭ типа GT200. Перед началом контроля был определен уровень шума, он составлял до 45 дБ. Были установлены следующие параметры: порог 48 дБ, ФВЧ 100 кГц, ФНЧ 300 кГц.

В открытом положении крышки сосуда измерили скорость распространения акустического сигнала и параметры затухания. На внутренней футеровке скорость составила 4130 м/с, коэффициент затухания 4 дБ/м. На корпусе сосуда скорость составила 3850 м/с, коэффициент затухания 2 дБ/м.

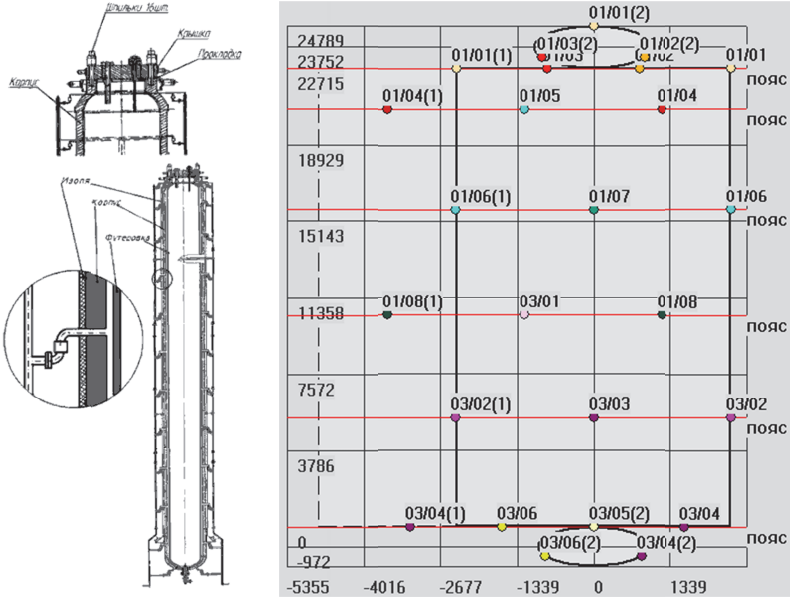


Рис. 1. Колонна синтеза. Схема расположения ПАЭ

Чтобы определить, проходят ли акустические сигналы от внутренней футеровки к корпусу, два ПАЭ были временно установлены с внутренней стороны на футеровку, и два ПАЭ с наружной стороны на корпус (рис. 2). Когда имитатор излучал на внутренней футеровке, на корпусе регистрировались сигналы низкой амплитуды. Было принято решение заполнить зазор между корпусом и футеровкой керосином, при этом ушло примерно 150 л. После заполнения керосином сигнал стал проходить достаточно хорошо.

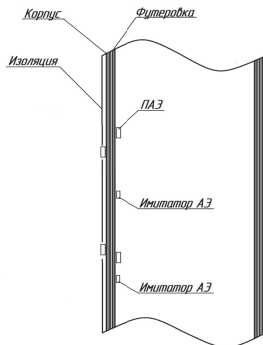


Рис. 2. Схема эксперимента по определению качества акустического контакта между внутренней футеровкой и корпусом

Из-за невозможности нагружения рабочей средой использовалась горячая вода (+85 °С), скорость нагружения составляла 2,3 (кгс/см²)/мин.

В начале нагружения регистрировались сигналы АЭ с амплитудой до 91 дБ, вызванные гидродинамическими явлениями при подъеме давления, а также работой механизма лебедки, прикрепленной к объекту для его технического обслуживания (рис. 3).



Рис. 3. Графики нагружения (кгс/см²), амплитуд (дБ), суммарного счета импульсов и средней длительности (мкс):
***а* – на каналах 1–11 на верхнем днище и цилиндрической части;**
***б* – на каналах 12–14 на границе цилиндрической части и нижнего днища**

При давлении выше 100 кгс/см² начали преобладать сигналы АЭ с амплитудами до зашкальных в нижней части объекта (рис. 4). Их особенностью являлось большое значение длительности, что делало невозможным проведение точной локации на нижнем днище.

При этом во время основной выдержки практически отсутствовали сигналы, лоцируемые на верхнем днище и цилиндрической части.

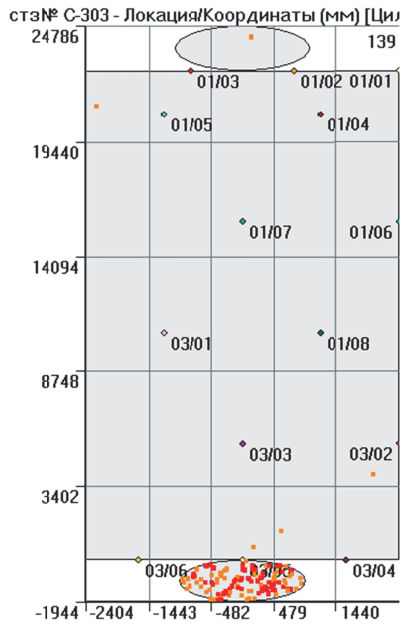


Рис. 4. Результаты локации во время основной выдержки

Было принято решение провести локальную механическую очистку и протравление нижней части сосуда – от нижней точки днища на расстояние до 2 м, а также повторно провести неразрушающий контроль капиллярным методом. По результатам применения капиллярного метода контроля было обнаружено множество дефектов – трещин и свищей, которые оказались пропущены при первом контроле данным методом (рис. 5).



Рис. 5. Подтвержденные капиллярным методом дефекты

Выводы

1. Был проведен АЭ-контроль колонны синтеза высотой 24 м со следующими особенностями: зазор между корпусом и футеровкой, верхняя крышка крепится с помощью 16 шпилек, между верхней крышкой и корпусом находится алюминиевая уплотнительная прокладка.

2. Для улучшения акустического контакта между внутренней футеровкой и корпусом пространство между ними было заполнено керосином.

3. В связи с отсутствием доступа к внутренней части шпилек и к поверхности уплотнительной прокладки остались нерешенными вопросы организации проведения их АЭ-контроля, такие как установка ПАЭ, выбор схемы локации, выявление течей в зоне уплотнительной прокладки.

4. При помощи метода АЭ-контроля были выявлены дефекты в нижнем днище колонны синтеза, которые оказались пропущены при первом капиллярном контроле.

5. При повторном проведении неразрушающего контроля нижнего днища капиллярным методом было обнаружено множество дефектов – трещин и свищей.

УДК 620.179.17:53.089.6

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ: АНАЛИЗ И ПОСТРОЕНИЕ АЧХ

Башков О.В.¹, Башков И.О.¹, Ромашко Р.В.²¹Комсомольский-на-Амуре государственный университет,
Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: bashkov@kncasctu.ru²Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,
Владивосток, Россия. E-mail: romashko@dvo.ru

Предложена методика расчета коэффициентов АЧХ волоконно-оптического датчика (ВОД). Методика основана на использовании известной АЧХ локального преобразователя акустической эмиссии (ПАЭ) и амплитудных спектров сигналов АЭ, зарегистрированных одновременно ПАЭ и ВОД, вызванных возбуждением источника Су – Нильсена на различном расстоянии от датчиков. Коэффициент корреляции между АЧХ, полученными для различных расстояний до источника АЭ, составляет 0,86–0,91 в диапазоне частот до 50 кГц.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, волоконно-оптический датчик, пьезоэлектрический преобразователь, преобразователь акустической эмиссии, амплитудно-частотная характеристика, полимерный композиционный материал, Су – Нильсен

Введение

Метод акустической эмиссии (АЭ) является одним из наиболее эффективных методов неразрушающего контроля и мониторинга технического состояния конструкций. Он основан на регистрации упругих волн, генерируемых в материале при его деформации, зарождении и развитии трещин или структурных изменениях [1]. Диапазон частот сигналов АЭ может простирается от единиц кГц до нескольких МГц [2]. Ключевую роль в регистрации этих сигналов играют датчики, и точность последующего анализа напрямую зависит от знания их частотных характеристик.

Для локальных преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) процедуры калибровки и построения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) хорошо формализованы и стандартизированы. Общие требования к проведению калибровки датчиков АЭ регламентируются, например, в стандарте ASTM E976 [3] и в обзоре [4]. Большинство методов калибровки основаны на использовании эталонного источника (например, разрушение стеклянного капилляра или пьезоизлучатель) и сравнении сигнала испытуемого датчика с сигналом эталонного широкополосного датчика [5]. Однако пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) чувствительны к электромагнитным помехам и требуют применения экранированных кабелей [6].

В отличие от локальных ПАЭ, волоконно-оптические датчики (ВОД) обладают рядом преимуществ: невосприимчивость к электромагнитным полям, коррозионная стойкость, малый вес и возможность распределенного контроля [7]. Однако построение их АЧХ является более сложной задачей. Как показано в работе [8], частотная характеристика ВОД зависит не только от схемы регистрации (интерферометра), но и от геометрических размеров и упругих свойств материала, в который встроено волокно, а также от способа его укладки. Существующие подходы к оценке характеристик распределенных акустических сенсоров (DAS) часто фокусируются на влиянии параметров опроса (длины импульса, частоты дискретизации) на чувствительность и частотный диапазон [9, 10]. Однако методы восстановления АЧХ ВОД, встроенного в композитный материал, с учетом трансформации волны в канале распространения, на сегодняшний день проработаны недостаточно.

Целью данной работы является разработка методики восстановления АЧХ распределенного волоконно-оптического датчика, интегрированного в пластину из полимерного композиционного материала (ПКМ), с использованием сигналов АЭ, зарегистрированных на разных расстояниях от источника.

Экспериментальная установка и методика расчета АЧХ

Эксперименты проводились на пластине из стеклопластика размерами 550×550 мм и толщиной 8 мм. На поверхность пластины было приклеено оптическое волокно, подключенное к измерительной системе. Рядом с волокном на равном расстоянии от его краев, был установлен ПЭП, в качестве которого использовался ПАЭ модели GT301 с известной АЧХ.

GT301 является широкополосным ПАЭ с рабочим диапазоном частот 50–500 кГц, резонансной частотой 251 кГц и коэффициентом электроакустического преобразования > 50 дБ отн. 1 В/м/с. Схема эксперимента подробно описана в работе [11] (рис. 1).

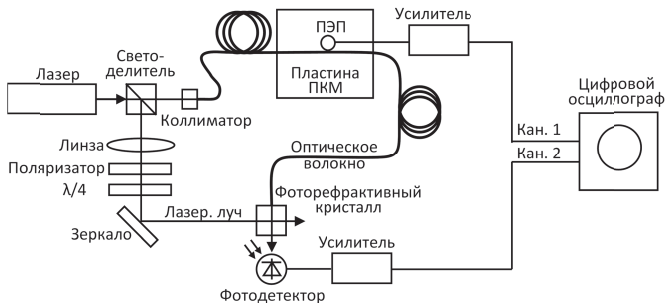


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В целях эксперимента была получена характеристика коэффициента электромеханического преобразования ПАЭ совместно с усилителем в расширенном диапазоне частот 2–1000 кГц (рис. 2) Девиация коэффициента преобразования в диапазоне 2–50 кГц составила 36 дБ, в диапазоне 50–1000 кГц – 27 дБ.

Регистрация сигналов АЭ осуществлялась с помощью адаптивного лазерного голографического интерферометра, собранного по схеме Маха – Цендера [12].



Рис. 2. Коэффициент электромеханического преобразования ПАЭ GT301, полученный совместно с усилителем

Принцип работы установки основан на двухволновом взаимодействии в фоторефрактивном кристалле CdTe. Фото измерительной системы приведено на рис. 3. Особенностью такой схемы является то, что она работает как фильтр верхних частот с частотой среза 500–1000 Гц, что позволяет эффективно регистрировать высокочастотные сигналы АЭ.

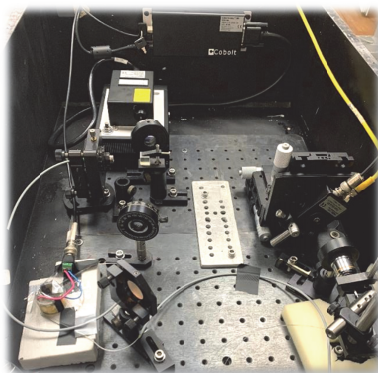


Рис. 3. Фото волоконно-оптической измерительной системы

Сигналы АЭ возбуждались с помощью имитатора Су – Нильсена (тест на излом грифеля карандаша) на различных расстояниях l от датчиков: 0 мм, 125 мм и 300 мм. Сигналы АЭ регистрировались одновременно локальным ПАЭ и ВОД, для которых в дальнейшем рассчитывались спектральные плотности $F_{PZT(l)}(f)$ и $F_{FOS(l)}(f)$ с помощью преобразования Фурье.

Схема распространения АЭ-волны в пластине, регистрируемой распределенным ВОД и локальным ПАЭ, приведена на рис. 4. Распределенный характер ВОД обеспечивает влияние значительной доли пластины, как канала распространения АЭ-волны, на конечную АЧХ ВОД.



Рис. 4. Схема регистрации АЭ-волн в пластине с помощью локального ПАЭ и ВОД

Спектральные характеристики зарегистрированных сигналов можно описать как произведение спектра источника $F_{source}(f)$, коэффициента передачи акустического канала $K_{chan(l)}(f)$ (зависящего от расстояния l до источника) и АЧХ самого датчика [11]:

$$F_{PZT(l)}(f) = F_{source}(f)K_{PZTchan(l)}(f)K_{PZT}(f); \quad (1)$$

$$F_{FOS(l)}(f) = F_{source}(f)K_{FOSchan(l)}(f)K_{FOS}(f). \quad (2)$$

Поскольку АЧХ пьезодатчика $K_{PZT}(f)$ известна, а при расположении источника в непосредственной близости к датчику ($l = 0$) влиянием канала распространения можно пренебречь ($K_{PZTchan(0)}(f) \approx 1$), спектр источника может быть определен из выражения

$$F_{source}(f) = \frac{F_{PZT(0)}(f)}{K_{PZT}(f)}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2) для сигнала ВОД, зарегистрированного на расстоянии l , получаем выражение, позволяющее восстановить произведение

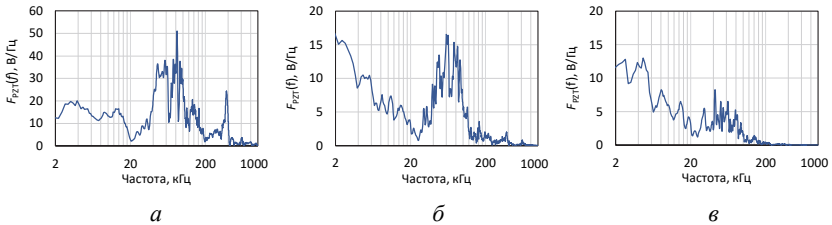
АЧХ волоконно-оптического датчика и коэффициента передачи акустического канала:

$$K_{FOS}(f)K_{FOSchan(l)}(f) = \frac{F_{FOS(l)}(f)}{F_{source}(f)} = K_{PZT}(f) \frac{F_{FOS(l)}(f)}{F_{PZT(o)}(f)}. \quad (4)$$

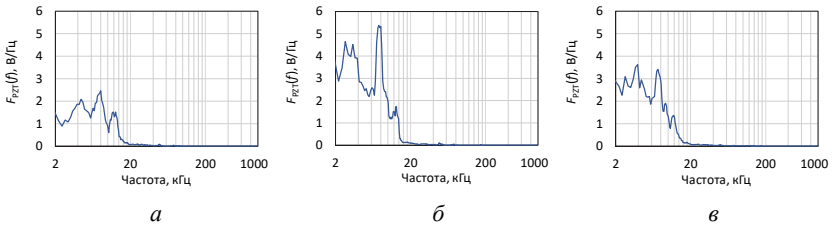
Таким образом, для восстановления искомой характеристики ВОД необходимы: АЧХ эталонного ПАЭ, спектр сигнала ПАЭ, зарегистрированного вблизи источника, и спектр сигнала ВОД, зарегистрированного на исследуемом расстоянии.

Результаты

В ходе эксперимента были зарегистрированы сигналы АЭ и рассчитаны их Фурье-спектры для ПАЭ (рис. 5) и ВОД (рис. 6) на трех расстояниях от источника. Видно, что форма спектров существенно трансформируется по мере удаления от источника, что связано с влиянием частотно-зависимого затухания и дисперсии волновых мод в пластине ПКМ [13].



**Рис. 5. Фурье спектры сигналов АЭ, зарегистрированных ПАЭ на расстоянии от источника:
а – 0 мм, б – 125 мм, в – 300 мм**



**Рис. 6. Фурье спектры сигналов АЭ, зарегистрированных ВОД на расстоянии от источника:
а – 0 мм, б – 125 мм, в – 300 мм**

С использованием формулы (4) и известной АЧХ эталонного ПАЭ были восстановлены нормированные АЧХ измерительной системы волоконно-оптического датчика (рис. 7). Анализ показывает, что АЧХ ВОД, восстановленные по сигналам, зарегистрированным на разных расстояниях, имеют качественное подобие.

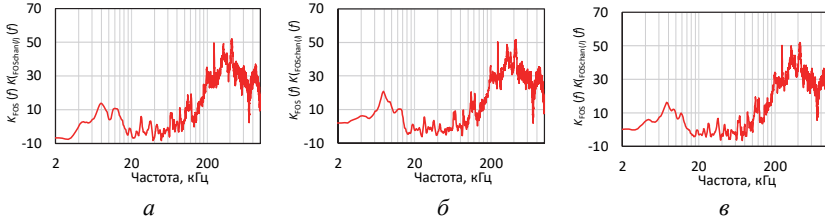


Рис. 7 Восстановленные АЧХ ВОД с учетом канала распространения АЭ-волны на расстоянии от источника: а – 0 мм, б – 125 мм, в – 300 мм

Анализ АЧХ ВОД, полученных с учетом трансформации ультразвуковой волны на расстояниях от 0 до 300 мм, показывает наличие между ними общих признаков. В диапазоне до 8 кГц наблюдается рост коэффициента преобразования на 15–20 дБ, что связано с адаптивными свойствами интерферометра (подавление низких частот). Снижение значения коэффициента на 18–25 дБ в диапазоне от 8 до 20 кГц обусловлено особенностями регистрации антисимметричной моды Лэмба, распространяющейся в пластине. Наличие локальных особенностей в диапазоне 20–60 кГц с девиацией значений до 10 дБ связано с регистрацией симметричной моды, имеющей меньшую амплитуду.

Для количественной оценки подобия АЧХ, восстановленных для разных расстояний, был рассчитан коэффициент корреляции Пирсона r (рис. 8). На частоте 50 кГц коэффициент корреляции между АЧХ, полученными для расстояний 0 и 300 мм, составляет 0,86–0,91.

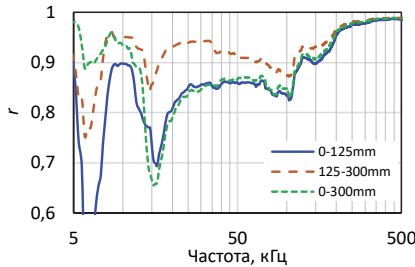


Рис. 8. Коэффициент корреляции между АЧХ, восстановленными для различных расстояний от источника

Повышение значений коэффициента корреляции в области частот выше 100 кГц указывает на то, что в этом диапазоне вклад канала распространения $K_{FOSchan(f)}$ становится менее значительным, либо его влияние носит более однородный характер. Тем не менее, наиболее информативным диапазоном частот для анализа собственной АЧХ датчика можно считать область до 50 кГц, где корреляция остается высокой.

Выводы

В результате проведенного исследования была предложена и апробирована методика восстановления АЧХ распределенного волоконно-оптического датчика, встроенного в пластину из ПКМ. Методика основана на совместном анализе сигналов АЭ от одного источника, зарегистрированных исследуемым ВОД и эталонным ПАЭ с известной характеристикой. Это позволяет исключить вклад спектра источника и, частично, влияние акустического тракта.

Установлено, что АЧХ ВОД, восстановленная по сигналам с разных расстояний, демонстрирует высокую степень корреляции (0,86–0,91) в диапазоне частот до 50 кГц. Это позволяет рассматривать данный диапазон как наиболее достоверный для оценки характеристик датчика. Выявленные различия в АЧХ на более высоких частотах обусловлены частотно-зависимым затуханием и дисперсией акустических мод в материале пластины, что подтверждает необходимость учета свойств объекта контроля при калибровке встроенных датчиков.

Предложенная методика может быть использована для калибровки распределенных волоконно-оптических сенсоров непосредственно в структуре материала, что является важным шагом на пути их практического применения в системах мониторинга состояния ответственных конструкций из композиционных материалов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 24-29-00838) на оборудовании ЦКП «Новые материалы и технологии».

Список литературы

1. Grosse, C.U. Acoustic Emission Testing / C.U. Grosse, M. Ohtsu. Berlin: Springer, 2008. 404 p.
2. Eaton, M.J. PyCalibrAE: An Open-Source Toolbox for Broadband Calibration of Ultrasonic Sensors / M.J. Eaton, R. Pullin, K.M. Holford // IEEE Sensors Journal. 2025. Vol. 25. No. 19. Pp. 36230–36242.
3. ASTM E976-15. Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015. 12 p.
4. Ono, K. Calibration Methods of Acoustic Emission Sensors / K. Ono // Materials. 2016. Vol. 9. P. 508. URL: <https://doi.org/10.3390/ma9070508>

5. Jomdecha, C. A Resonance Acoustic Emission Sensor using Single Piezoelectric Ceramic / C. Jomdecha, A. Prateepasen // *KMUTT Research and Development Journal*. 2006. Vol. 29. No. 4. Pp. 483–498.

6. Willberry, J.O. Structural Health Monitoring Using Fibre Optic Acoustic Emission Sensors / J.O. Willberry, M. Papaalias, G. Franklyn Fernando // *Sensors*. 2020. Vol. 20. No. 21. P. 6369. DOI: 10.3390/s20216369.

7. Пнев, А.Б. Особенности метрологического обеспечения информационно-измерительных систем на основе волоконно-оптических датчиков / А.Б. Пнев, С.В. Тихомиров, Н.П. Хатырев // *Фотон-экспресс*. 2009. № 6 (78). С. 98–99.

8. Features of Application of Adaptive Interferometric Fiber Optic Sensors of Acoustic Emission to Monitor the Condition of Polymer Composite Materials / R.V. Romashko, O.V. Bashkov, T.A. Efimov [et al.] // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2024. Vol. 60. No. 1. Pp. 16–25. DOI: 10.1134/S106183092360140X.

9. Interferometric Fiber Optic Sensors / B.H. Lee, Y.H. Kim, K.S. Park [et al.] // *Sensors*. 2012. Vol. 12. No. 3. Pp. 2467–2486. DOI: 10.3390/s120302467.

10. Метрологическое обеспечение информационно-измерительных систем на основе волоконно-оптических датчиков / В.В. Григорьев, А.К. Митюрёв, А.О. Погоньшев [и др.] // *Фотон-экспресс*. 2019. № 6 (158). С. 36–37. DOI: 10.24411/2308-6920-2019-16013.

11. Effect of Elastic Stresses in FRP Composite on the Frequency Characteristics of Acoustic Emission Signals Recorded by a Fiber-Optic Sensor / R.V. Romashko, O.V. Bashkov, I.O. Bashkov [et al.] // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2024. Vol. 88. Suppl. 4. Pp. S670–S675. DOI: 10.1134/S1062873824710675.

12. Характеристики сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных адаптивными голографическими волоконно-оптическими датчиками на пластине алюминиевого сплава Д16 / О.В. Башков, А.А. Брянский, Т.А. Ефимов [и др.] // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2022. № 7 (63). С. 102–108. DOI 10.17084/20764359-2022-63-102.

13. Viktorov, I.A. Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications / I.A. Viktorov. New York: Plenum Press, 1967. 154 p.

УДК 534.08

ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ПРИ СОПРОВОЖДЕНИИ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА КРУПНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Сафьяник А.А.¹, Харебов К.В.¹, Живоносная Д.М.¹,
Мишунин В.С.¹, Суслов А.В.²

¹Общество с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр «ЭгидА»,
Самара, Россия. E-mail: aegis-rus@aegis-rus.com

²Самарский государственный технический университет,
Самара, Россия. E-mail: a.v.suslov@inbox.ru

В статье представлен опыт акустико-эмиссионного (АЭ) контроля при пневмоиспытаниях на крупных технологических установках. Рассмотрены четыре уникальных кейса, отличающихся масштабностью и использованием большого числа измерительных каналов. Авторы анализируют нормативную базу, специфику контроля протяженных контуров и типы выявленных дефектов. Особое внимание уделено корреляции параметров АЭ-импульсов с реальными утечками. В завершение предложены пути развития метода и возможности его масштабирования.

Ключевые слова: акустико-эмиссионный метод контроля технического состояния, пневматические испытания, контур высокого давления, параметры импульса акустической эмиссии, нефтегазовая отрасль

Введение

В рамках жизненного цикла предприятия неоднократно возникают задачи по диагностике и ремонту оборудования. При этом, согласно нормативной документации, ряд мероприятий, таких как монтаж, реконструкция, освидетельствование и окончание срока консервации трубопроводов на установках, работающих под избыточным давлением, должны сопровождаться дополнительными способами контроля целостности контура [1–5]. Одним из типовых способов проверки закрытых контуров на плотность и герметичность является проведение пневматического испытания (ПИ), заключающегося в заполнении контура газом под избыточным давлением. При таком подходе существует несколько принципиальных сложностей, затрудняющих проведение контроля контуров большой протяженности:

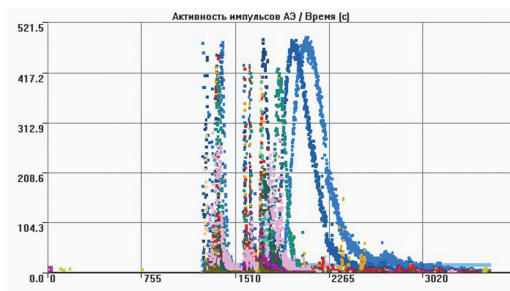
1. Необходимость использования большого объема измерительных линий.
2. Сложность в расстановке измерительных линий.
3. Сложность обработки большого объема, полученной в процессе контроля информации.

4. Потребность в большом штате квалифицированного персонала.
5. Сложности организации процесса контроля.
6. Технические сложности, связанные с особенностями метода испытаний.

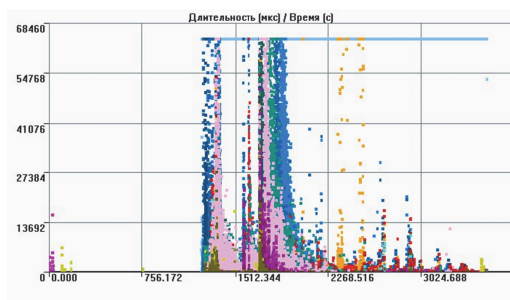
Последний пункт связан с несколькими факторами. Так как подобный тип испытаний предполагает постепенный набор давления в закрытом контуре, уже на начальных стадиях могут быть обнаружены места утечек. Однако при несвоевременном обнаружении факта их наличия испытательная среда продолжит поступать в контур, нагнетая давление, что может привести к достижению объема пропуска, который невозможно будет в последующем устранить путем протяжки крепежа. В перспективе это может стать причиной не только критического ущерба инфраструктуре предприятия и негативных последствий для окружающей среды, но и травм персонала, особенно при утечке особо токсичных сред. Отдельную сложность представляет то, что из-за большого объема испытательной среды давление не может быть сброшено мгновенно, что придает процессу значительную инерцию, провоцируя повышенные риски. При этом даже своевременное обнаружение утечки и ее устранение не гарантирует, что она снова не проявится на более высоких уровнях испытательного давления. Другим фактором является число утечек, которое на протяженных объектах может составлять сотни единиц и сложность их своевременного визуального контроля.

В связи с этим согласно [6] ПИ должны сопровождаться акустико-эмиссионным контролем. Метод акустической эмиссии (АЭ) основан на физическом явлении, которое представляет собой возбуждение упругих колебаний материала, вызванное образованием и развитием дефектов или пропуском среды через сквозной дефект. Эти колебания регистрируются преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ), расположенными на поверхности оборудования. По последовательности прихода и времени регистрации упругого возмущения несколькими ПАЭ определяется местоположение дефекта.

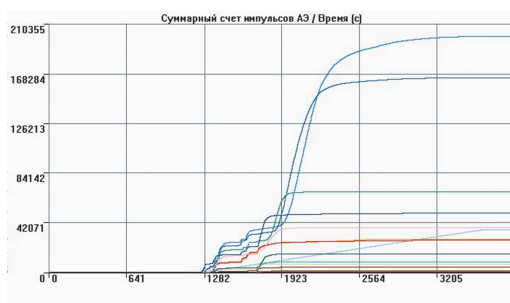
В большинстве случаев определение степени опасности источников АЭ осуществляется с использованием амплитудного критерия, локально-динамического критерия и критерия непрерывной АЭ. По результатам классификации источников АЭ в соответствии с критериями опасности принимают решение о возможности дальнейшей безопасной эксплуатации оборудования или выводу его из эксплуатации. Для уточнения характеристик дефектов, связанных с обнаруженными источниками, как правило, используют альтернативные методы неразрушающего контроля. На графиках, представленных на рис. 1, видны процессы, связанные с пропусками сразу на множестве фланцевых соединений.



a



б



в

Рис. 1. Зависимость параметров импульсов АЭ от времени при множественных пропусках на фланцевых соединениях:
a – зависимости активности импульса АЭ от времени,
б – зависимости длительности импульса, АЭ от времени,
в – зависимости суммарного счета импульсов от времени

Процедура выполнения АЭ-контроля при проведении ПИ на прочность и плотность протяженных контуров ВД включает в себя:

- установку ПАЭ на поверхность оборудования и размотку кабельных линий;
- настройку программируемых параметров акустико-эмиссионных комплексов, задание графиков и диаграмм зависимостей различных параметров сигналов АЭ, а также локационных карт объектов для оперативной оценки данных АЭ, регистрируемых в процессе контроля;
- калибровку ПАЭ перед проведением контроля;
- сбор данных АЭ при нагружении оборудования (ПИ);
- калибровку ПАЭ после проведения контроля;
- демонтаж ПАЭ и смотку кабельных линий;
- обработку и фильтрацию данных АЭ, полученных в результате контроля;
- классификацию и определение степени опасности источников АЭ;
- оценку технического состояния оборудования по результатам испытаний.

Таким образом, сопровождение ПИ протяженных контуров высокого давления (ВД) на нефтегазоперерабатывающих предприятиях с применением метода АЭ является актуальной задачей, сопряженной с рядом проблем, связанных как с техническими сложностями, так и с повышенными требованиями к организационным возможностям подрядных организаций.

Основные проблемы при проведении крупномасштабных испытаний

В качестве примера рассмотрим четыре технологических установки, расположенные на территории одного предприятия. Краткая информация об объектах контроля и объеме измерительного оборудования приведены в табл. 1.

В ООО «НТЦ «ЭгидА» для АЭ-контроля при проведении пневматического испытания на прочность и плотность оборудования обычно используются акустико-эмиссионные измерительные комплексы A-LineDDM-1 и A-LineDDM-2. В составе указанных акустико-эмиссионных измерительных комплексов применяются пьезоэлектрические ПАЭ типа GT200, GT205 производства ООО «ГлобалТест» (г. Саров) и BT1 производства ООО «Донские измерительные системы» (г. Ростов-на-Дону), а также ПАЭ типа SR190 производства ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ» (г. Москва). В качестве дополнительного оборудования, используемого при подготовке объектов к контролю (проведения калибровки ПАЭ, имитации сигналов АЭ для измерения их затухания и определения скорости распространения в конструкции объектов), применяется специальный имитатор сигналов АЭ производства ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ».

Таблица 1

Объекты контроля

Параметр	Объект 1	Объект 2	Объект 3	Объект 4
Назначение	Установка селективной гидроочистки нефтепродуктов (нафты) (реакторного блока)	Контур ВД секции установки гидроочистки керосина (реакторного блока)	Контур ВД секции установки гидроочистки дизельного топлива (реакторного блока)	Контур ВД установки гидроочистки средних дистиллятов
Продукты	Нафта, водород, гидроочищенная нафта, рециркулирующий ВСГ, насыщенный амин	Насыщенный амин, продукты реактора, циркуляционный ВСГ, водород, керосин, жидкие углеводороды, кислая вода	Тоший амин, газойль, углеводородный газ, циркуляционный ВСГ, нафта, насыщенный амин, водород, жидкие углеводороды, продукт реактора, кислая вода	Насыщенный амин, кислая вода, сырье реактора УГД/УГК, горячая жидкость ВД, объединенное сырье реактора УГД, отходящий поток реактора УГД/УГК, газообразный/ жидкий хладагент, горячие/холодные пары ВД, жидкость ХСВД/ ГСВД, газ очистки, циркулирующий газ
Число измерительных линий	8	7	12	18
Число ПАЭ	248	232	424	576

Объект 1. Установка селективной гидроочистки нефтепродуктов (нафты) (реакторного блока)

Для выполнения АЭ-контроля при проведении пневматического испытания на прочность и плотность оборудования контура ВД секции установки селективной гидроочистки нефтепродуктов (нафты) (реакторного блока) использовались ПАЭ типа GT200, BT1 и SR190. Всего на контролируемом оборудовании в контуре ВД было установлено 248 ПАЭ, расположенных в 8-ми расстановках («включениях»). При этом в 1-й расстановке использовалось 32 ПАЭ, во 2-й расстановке – 32 ПАЭ; в 3-й расстановке – 32 ПАЭ; в 4-й расстановке – 32 ПАЭ; в 5-й расстановке – 40 ПАЭ; в 6-й расстановке – 32 ПАЭ; в 7-й расстановке – 32 ПАЭ; в 8-й расстановке – 16 ПАЭ.

Нагружение контура производилось передвижными компрессорами со скоростью не более $0,2 \text{ МПа}$ (2 кгс/см^2) в минуту, при которой не возникают интенсивные помехи, с промежуточными остановками в течение 10 мин через каждые 25 % от расчетного давления согласно рис. 2.

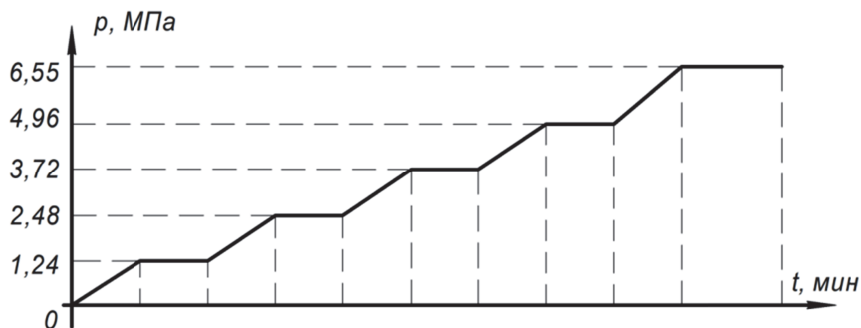


Рис. 2. График зависимости давления в контуре ВД установки селективной гидроочистки нефтепродуктов (нафты) от времени нагружения

В результате проведения АЭ-контроля был выявлен ряд утечек, расположенных в основном во фланцевых соединениях. Наибольший интерес здесь вызвали трубопровод транспортировки нафты от насосов (2 источника), трубопровод транспортировки водорода (1 источник), трубопровод гидроочищенной нафты (15 источников) и отбойная емкость на приеме циркуляционного компрессора (1 источник). Стоит отметить, что наличие наибольшего числа утечек на трубопроводе гидроочищенной нафты является следствием влияния человеческого фактора, а не протекающих технологических процессов. На рис. 3 представлен пример регистрации АЭ на одной из расстановок.

Как видно из графиков, в большинстве случаев при возрастании активности импульсов АЭ и снижении их длительности могут свидетельствовать о наличии дефекта, а постоянная амплитуда нередко свидетельствует об утечке. Основная трудность контроля подобных крупных объектов заключается в необходимости оперативно определять конкретные точки пропусков и своевременно их верифицировать (подтверждать) для оперативного устранения. Также не стоит забывать, что уже устраненные пропуски на фланцевых соединениях, устраненные на более низком уровне испытательного давления, могут заново повториться при повышении давления. Данный случай является показательным примером, подтверждающим необходимость проведения гидроиспытаний после ремонта.

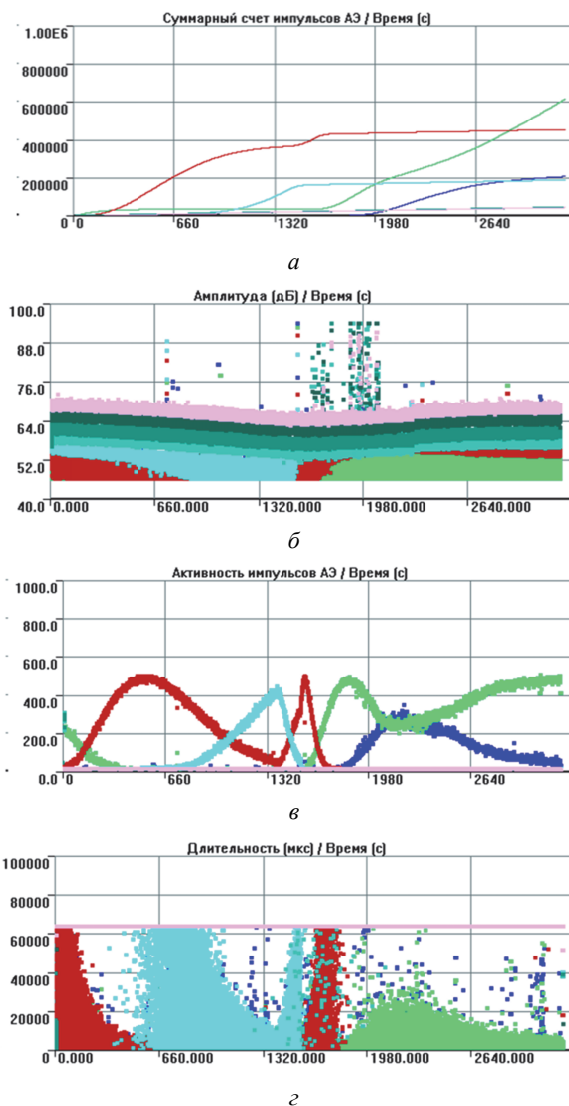


Рис. 3. Зависимость параметров импульсов АЭ от времени на одной из расстановок, расположенных на трубопроводе гидроочищенной нефти:
a – зависимость суммарного счета импульсов АЭ от времени,
b – зависимость амплитуды импульсов АЭ от времени,
v – зависимость активности импульса АЭ от времени,
z – зависимости длительности импульса

Объект 2. Контур ВД секции установки гидроочистки керосина (реакторного блока)

Для выполнения АЭ-контроля при проведении ПИ на прочность и плотность оборудования контура ВД секции установки гидроочистки керосина (реакторного блока) использовались ПАЭ типа GT200, BT1 и SR190. Всего на контролируемом оборудовании в контуре ВД было установлено 232 ПАЭ, расположенных в 7 расстановках («включениях»). При этом в 1-й расстановке использовалось 32 ПАЭ, во 2-й расстановке – 32 ПАЭ; в 3-й расстановке – 32 ПАЭ; в 4-й расстановке – 32 ПАЭ; в 5-й расстановке – 40 ПАЭ; в 6-й расстановке – 32 ПАЭ; в 7-й расстановке – 32 ПАЭ.

Нагружение контура производилось передвижными компрессорами со скоростью не более 0,2 МПа (2 кгс/см²) в минуту, при которой не возникают интенсивные помехи, с промежуточными остановками в течение 10 мин через каждые 25 % от расчетного давления согласно рис. 4.

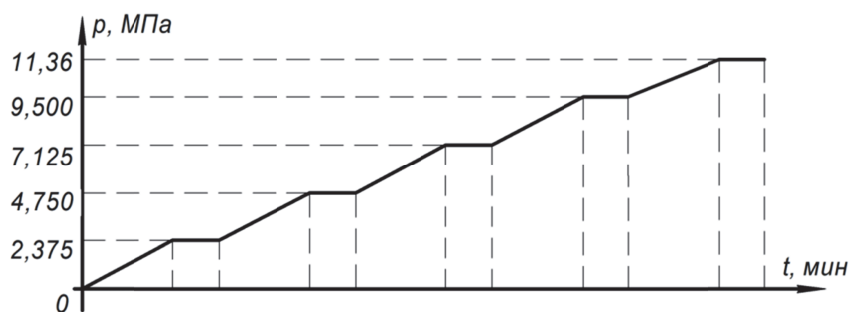


Рис. 4. График зависимости давления в контуре ВД секции установки гидроочистки керосина (реакторного блока) от времени нагружения

В ходе ПИ данного контура ВД был зарегистрирован ряд источников АЭ, параметры которых свидетельствовали о наличии процессов, предшествующих появлению утечек (рис. 5, 6). При этом наибольшее число источников АЭ было зарегистрировано на трубопроводе водорода (4 источника) и трубопроводе продукта реактора (4 источника).

Для верификации таких дефектов обычно используется мыльный раствор, который облегчает визуализацию, что позволяет своевременно обнаружить и устранить течь.



Рис. 5. Утечка на фланцевом соединении трубопровода водорода



Рис. 6. Утечка на фланцевом соединении трубопровода продукта реактора

Объект 3. Контур ВД секции установки гидроочистки дизельного топлива (реакторного блока)

Для выполнения АЭ-контроля при проведении ПИ на прочность и плотность оборудования контура ВД установки гидроочистки дизельного топлива (реакторного блока) использовались ПАЭ типа GT200, BT1 и SR190. Всего на контролируемом оборудовании в контуре ВД было установлено 424 ПАЭ, расположенных в 12 расстановках («включениях»). При этом в 1-й расстановке использовалось 32 ПАЭ, во 2-й расстановке – 32 ПАЭ; в 3-й расстановке – 32 ПАЭ; в 4-й расстановке – 32 ПАЭ; в 5-й расстановке – 40 ПАЭ; в 6-й расстановке – 32 ПАЭ; в 7-й расстановке – 32 ПАЭ; в 8-й расстановке – 32 ПАЭ, в 9-й расстановке – 32 ПАЭ, в 10-й расстановке – 32 ПАЭ, в 11-й расстановке – 32 ПАЭ, в 12-й расстановке – 32 ПАЭ.

Нагружение контура производилось передвижными компрессорами со скоростью не более 0,2 МПа (2 кгс/см²) в минуту, при которой не возникают интенсивные помехи, с промежуточными остановками в течение 10 мин через каждые 25 % от расчетного давления согласно и рис. 7.

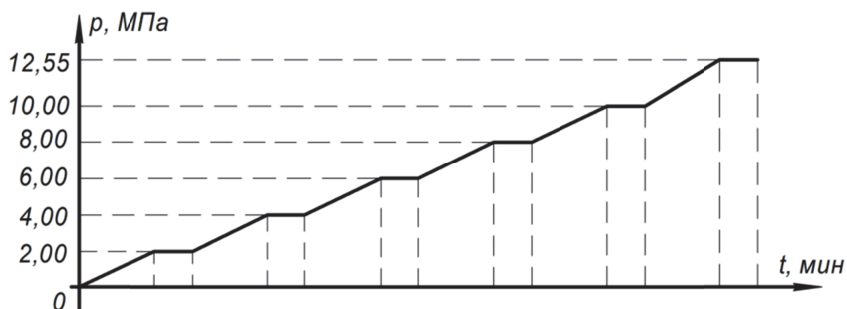


Рис. 7. График зависимости давления в контуре ВД секции установки гидроочистки дизельного топлива (реакторного блока) от времени нагружения

В результате проведения АЭ-контроля при проведении ПИ данного контура ВД также был зарегистрирован ряд источников АЭ. Наибольшее число источников АЭ было выявлено в трубопроводе жидких углеводородов (15 источников), трубопроводе продукта реактора (7 источников) и реакторе обессеривания (5 источников). Основным типом дефектов тут также были фланцевые соединения (рис. 8).

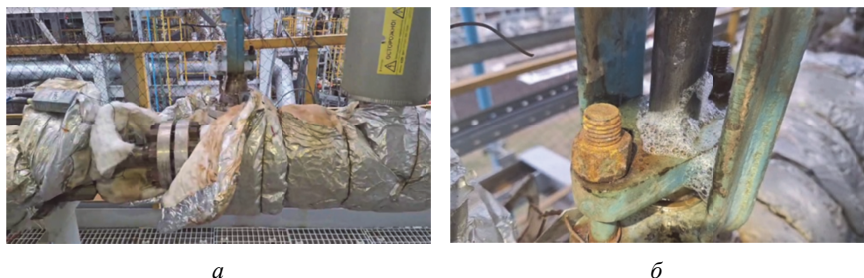


Рис. 8. Течь на уплотнителе запорного устройства
а – общий вид, *б* – обмыливание течи

Интересной особенностью данного объекта является то, что помимо утечек на фланцевых соединениях были выявлены проблемы с уплотнителями запорных устройств, требующих технического обслуживания. Один из таких случаев представлен на рис. 9.

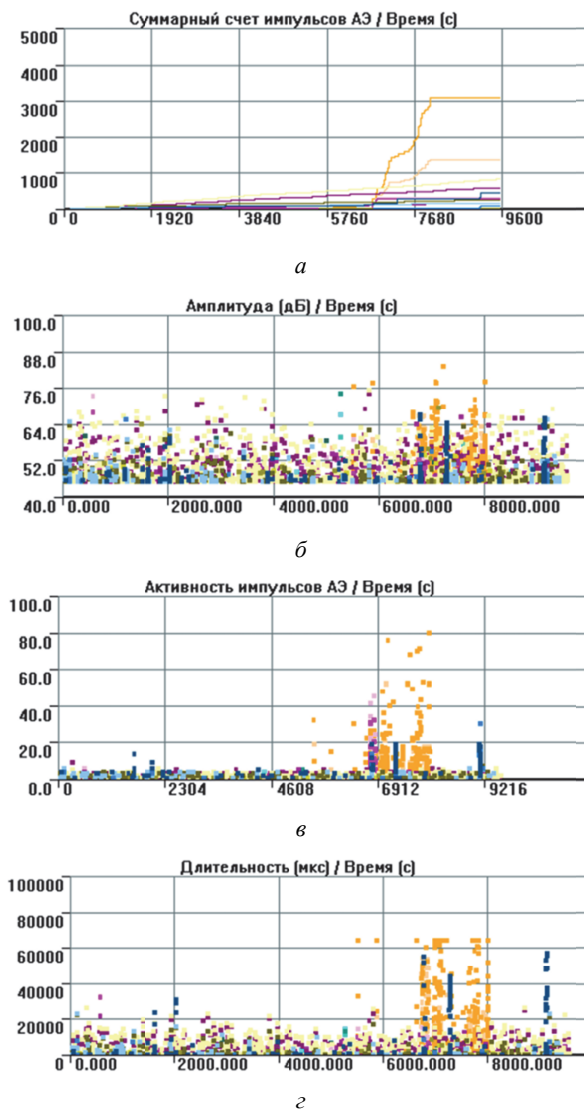


Рис. 9. Зависимость параметров импульсов АЭ от времени на одной из расстановок, расположенных на трубопроводе гидроочищенной нефти:
 а – зависимость суммарного счета импульсов АЭ от времени,
 б – зависимость амплитуды импульсов АЭ от времени,
 в – зависимость активности импульсов АЭ от времени,
 г – зависимости длительности импульса

Здесь виден всплеск активности, длившийся примерно 33 минуты, завершившийся со временем без постороннего вмешательства. В данном случае это свидетельствовало о самоуплотнении прокладки.

Объект 4. Контур ВД установки гидроочистки средних дистиллятов

Для выполнения АЭ-контроля при проведении ПИ на прочность и плотность оборудования контура ВД использовались ПАЭ типа GT200 и SR190. Всего на контролируемом оборудовании в контуре ВД было установлено 576 ПАЭ, расположенные в 18 расстановках («включениях»).

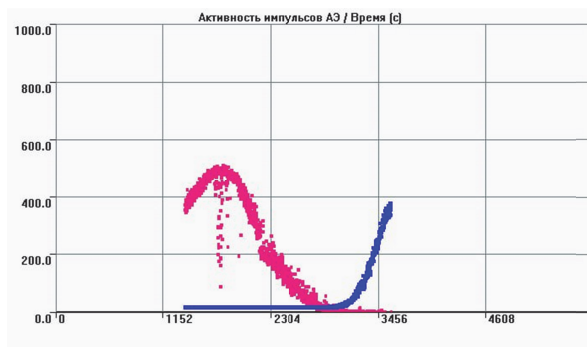
Нагружение контура производилось передвижными компрессорами со скоростью не более 0,2 МПа (2 кгс/см²) в минуту, при которой не возникают интенсивные помехи, с промежуточными остановками в течение 10 мин через каждые 25 % от расчетного давления согласно табл. 2. Фактическое время подъема составляло более 4 часов между промежуточными уровнями.

Таблица 2

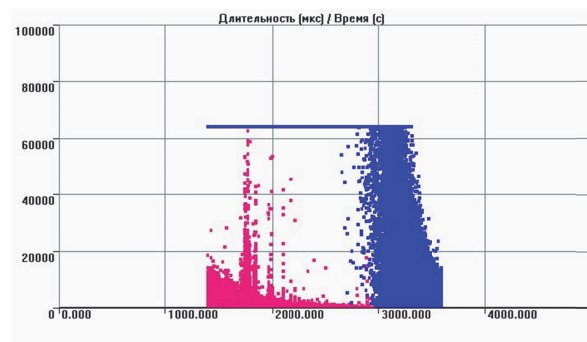
Программа нагружения контура ВД установки гидроочистки средних дистиллятов

Давление, МПа	Время подъема давления, мин (согласно Программе испытаний)	Время выдержки, мин
2	Не менее 20	10
4	Не менее 20	10
6	Не менее 20	10
8.13	Не менее 20	15
10.13	Не менее 20	10
12.63	Не менее 20	15

В ходе ПИ данного контура ВД был зарегистрирован ряд источников АЭ, параметры которых свидетельствовали о наличии процессов, предшествующих появлению утечек. При этом наибольшему риску пропуска подверглись трубопроводы горячей жидкости ВД (3 источника), трубопроводы объединенного сырья реактора УГД (4 источника), трубопроводы газа очистки (2 источника), сепаратор холодного высокого давления (3 источника). На рис. 10 представлены графики зависимости ряда информативных параметров импульса АЭ, свидетельствующих о появлении утечки через фланцевое соединение. Розовым цветом показан пример сильного пропуска, возникшего на трубопроводе газа очистки, а синим отображен пропуск, увеличивающийся во времени. Данные пропуски возникли после перехода от рабочего давления к испытательному.



a



б



в

Рис. 10. Зависимость параметров импульсов АЭ от времени при сильном (розовый) и плавно увеличивающемся (синий) пропусках на фланцевых соединениях, расположенных на трубопроводе газа очистки

Выводы

В статье представлен анализ масштабного акустико-эмиссионного контроля, проведенного в ходе ПИ протяженных контуров высокого давления. АЭ-метод является надежным инструментом раннего обнаружения утечек с высоким уровнем достоверности, обеспеченным в том числе применением адаптивных алгоритмов фильтрации производственных шумов, которые позволяют снизить количество ложных срабатываний в условиях масштабных испытаний. Уникальность задач обусловлена беспрецедентным количеством датчиков (до 576 ПАЭ, объединенных в 18 линий), что потребовало решения сложных организационно-технических задач.

Основные трудности были связаны с оперативным монтажом оборудования в труднодоступных зонах, где помимо строительных лесов привлекались промышленные альпинисты. Дополнительным вызовом стала конфигурация измерительных каналов: при такой протяженности линий стандартные процедуры калибровки и проверки работоспособности аппаратуры кратно усложняются. К техническим барьерам можно отнести отсутствие на сегодняшний день возможности объединения множества измерительных каналов всех используемых при контроле АЭ-систем в один комплекс и недостаточную защищенность приборов от осадков (ниже IP65), что критично для полевых условий. Также к подобным типам испытаний предъявляются повышенные требования по скорости обнаружения утечек, так как большой объем испытательной среды добавляет процессу сброса давления значительную инерцию.

Список литературы

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасной эксплуатации технологических трубопроводов»: [утв. Приказом Федер. службы по экол., технол. и атом. надзору от 21 декабря 2021 г. № 444: зарег. в Министерстве юстиций Российской Федерации 1 июня 2022 г., рег. № 686666].
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением»: [утв. Приказом Федер. службы по экол., технол. и атом. надзору от 15 декабря 2020 г. № 536: зарег. в Министерстве юстиций Российской Федерации 31 декабря 2020 г., рег. № 61998].
3. ГОСТ 32569-2013. Трубопроводы технологические стальные. Требования к устройству и эксплуатации на взрывопожароопасных и химически опасных производствах. М.: Стандартинформ, 2015. 130 с.
4. ГОСТ Р 52727-2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2007. 12 с.
5. ГОСТ Р 55045-2012. Акустико-эмиссионная диагностика. Термины, определения и обозначения. М.: Стандартинформ, 2019. 16 с.
6. Руководство по безопасности «Методические рекомендации о порядке проведения акустико-эмиссионного контроля»: [утв. Приказом Федер. службы по экол., технол. и атом. надзору от 05 ноября 2025 г. № 385].

УДК 620.179.17, 624.04

ВОЗМОЖНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА ПРИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОМ КОНТРОЛЕ

Игумнова Т.В., Герасимов С.И., Игумнов А.А.
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»,
Новосибирск, Россия. E-mail: itv@sgups.stu.ru

Актуальной является регистрация информативных параметров акустико-эмиссионного сигнала в условиях большого количества неопределенности и мешающих факторов. Для изучения процесса распространения акустико-эмиссионного сигнала и получения полезной части информативного сигнала акустической эмиссии может быть применен подход моделирования. В рамках исследования установлены условия верификации модели, при которых возможна реализация модельных экспериментов. В работе обсуждается опыт конечно-элементного моделирования сигналов акустической эмиссии в различных объектах контроля. Приведены примеры основных тестовых экспериментов и верификация модели. Целью настоящего исследования являлось совершенствование способов математического моделирования акустического тракта при акустико-эмиссионном контроле.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, акустическая эмиссия, моделирование источника сигнала

Одним из методов, позволяющим интегрально и дистанционно проводить контроль отсутствия развивающихся дефектов, течи, неисправности оборудования, является акустико-эмиссионный (АЭ) метод контроля. АЭ-метод находит все новое применение для самых разнородных объектов на всех стадиях жизненного цикла продукции, для новых современных материалов [1–5]. Особенностью применения АЭ-метода является необходимость разработки и обоснования для каждого объекта контроля схемы и методики контроля, а также критериев браковки, причем применение конкретных критериев чаще всего становится затруднительным в силу сложности требуемой математической обработки массива АЭ-данных, исключения помех, и влияния разных факторов. При акустико-эмиссионном (АЭ) контроле многопараметровость контроля является главным его ограничением [6–8]. Акустическая волна содержит множество мод, распространяющихся через ОК с разными скоростями. Процесс распространения волны от источника зависит от свойств материала, геометрии объекта, возможных неоднородностей – сварные швы, вставки, отверстия [9]. Акустические волны взаимодействуют с дефектами и геометрическими неоднородностями, отражаясь и преломляясь на них. На приемник приходит трансформированный, видоизмененный сигнал, вид которого зависит от того

пути, который он преодолел до приемного устройства [10–11]. При этом и сам акустический преобразователь регистрирует суперпозицию мод в точке установки на поверхность объекта контроля. В своем составе преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ) имеют пьезоэлектрический элемент, который преобразовывает колебания, направленные по нормали к контролируемой поверхности в электрический сигнал. ПАЭ также имеют собственную АЧХ, что также вносит коррективы в получаемый сигнал [12].

Распространение волнового пакета, особенно в неоднородной структуре, является сложным для анализа в общем виде и интерпретации процессом. Одним из возможных путей исследования процесса распространения акустических волн является аналитическое решение соответствующих дифференциальных уравнений движения при заданных граничных условиях. Такой подход может быть реализован для бездефектных моделей с очень простой геометрией. Однако аналитические решения становятся трудно реализуемыми для моделей со сложной геометрией или для объектов с дефектами. Другой подход к решению таких задач – это численное решение.

Общее уравнение движения акустической волны в матричной форме имеет вид:

$$M \cdot \ddot{\vec{u}} + C \cdot \dot{\vec{u}} + K \cdot \vec{u} = \vec{F}_0, \quad (1)$$

где M – матрица масс;

C – матрица затухания (сопротивления);

K – матрица жесткости;

\vec{F}_0 – вектор приложенной нагрузки;

$\ddot{\vec{u}}, \dot{\vec{u}}, \vec{u}$ – векторы смещения и его производные по времени.

В дальнейшем затуханием пренебрегаем. Пространственная и временная дискретизация являются критическими параметрами, которые должны регулироваться при моделировании и проведении расчетов. Шаг интегрирования должен быть выбран исходя из периода колебательного процесса. Для моделирования протекания высокочастотных процессов он должен быть достаточно мал, что может увеличивать время расчета. Поэтому шаг должен быть выбран оптимально. Так же, как и пространственная дискретизация для определенной длины волны. При проведении исследования были использованы линейные, оболочечного типа и объемные конечные элементы. В том случае, когда необходимо моделировать геометрические концентраторы напряжений, используются трехузловые элементы. Распределение массы по элементам считается однородным. Размер элементов подбирается таким, чтобы распространяющаяся волна могла быть пространственно разрешена.

Весь процесс исследования акустико-эмиссионного контроля (АЭК) объектов может быть разделен на следующие основные этапы, которые непосредственно влияют на достоверность моделирования процесса АЭК: моделирование источника сигнала, моделирование распространения акустических волн в объектах и моделирование приема акустического сигнала.

Математический расчет выполнен в программе COSMOS/M // SolidWorks. Для разработки методики моделирования распространения акустических волн требуется первичная верификация на простых одномерных задачах. Рассмотрен ряд задач в одномерной постановке (Модели 1–4), характеристики моделей и параметры моделирования приведены в табл. 1, 2. На рис. 1 представлены результаты моделирования для Модели 1.

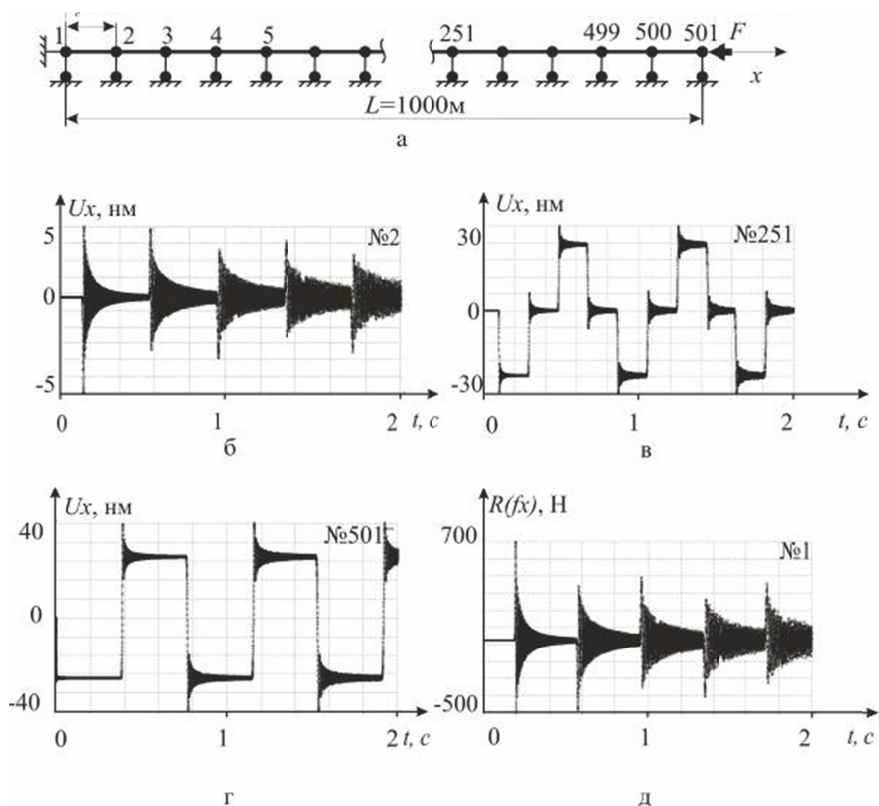


Рис. 1. Результаты расчета для Модели 1:
 а – граничные условия, б – перемещение U_x в узле № 2,
 в – перемещение U_x в среднем узле, г – перемещение U_x в крайнем узле,
 д – реакция в заделке

Для сравнения результатов рассчитана скорость C_l продольной акустической волны в моделях по известной формуле [13]

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости, Па;
 ρ – плотность материала, кг/м³.

Для линейной модели существует и анализируется только продольная волна.

Таблица 1

Параметры исследуемых стержневых моделей

	Длина, L , м	Размер элемента l_e , м	Колич. элементов	Колич. узлов	Тип элементов	Сила, F , кН	f , кГц
Модель 1 Стержень	1000	2	500	501	TRUSS2D	1	1
Модель 2 Стержень	4	2	2	3	TRUSS2D	1	1
Модель 3 Стержень	10,8	0,2	54	55	BEAM2D ($d = 18$ мм, S, I_z)	1	200
Модель 4 Стержень	10,8	0,02	512	513	BEAM2D	1	200

Принимая, что скорость распространения ультразвуковых волн C_l постоянна, время прихода волны до заделки для Модели 1 будет известно. Время распространения продольной волны в модели до заделки и обратно равняется $T = 2L/C_l = 0,38$ с, что соответствует результатам расчета и отклику в крайнем узле модели (рис. 1, ε). На свободном конце модели видны результаты распространения прямой и отраженной волн. В серединном узле отклик следующий. Акустическая волна приходит в момент времени 0,1 с, узел отклоняется от положения в отрицательную область (сжатие), когда приходит отраженная от заделки волна, узел отклоняется в положительную область (растяжение). Общим для всех функций U_x является строгая повторяемость процесса с периодом $T = 0,4$ мс. Чем ближе к заделке (рис. 1, δ), тем больше перемещение U_x имеет вид затухающих колебаний линейной системы с большой жесткостью.

Таблица 2

Свойства материала моделей

Модели	Модуль упругости, E , МПа	Коэффициент Пуассона, ν	Плотность, ρ , кг/м ³	Модуль упругости второго рода, G , МПа	Скорость продольной волны C_L , м/с
Сталь	$2,1 \cdot 10^5$	0,28	$7,9 \cdot 10^3$	$7,9 \cdot 10^4$	5200
Медь	$1,1 \cdot 10^5$	0,37	$8,9 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^4$	3500

При изменении физико-механических свойств модели, скорость распространения акустической волны изменяется и соответствует аналитическим расчетам для этого материала. Также была сделана верификация моделей по размеру конечных элементов и изучено влияние параметра на результаты расчета. Модель 2 служила тестовой моделью для изучения сложения волн и включала 3 узла. Модель 3 имела следующую особенность, результаты расчета должны учитывать собственный вес и начальный прогиб модели. Результаты расчета для нескольких узлов модели представлены на рис. 2, б, в, г.

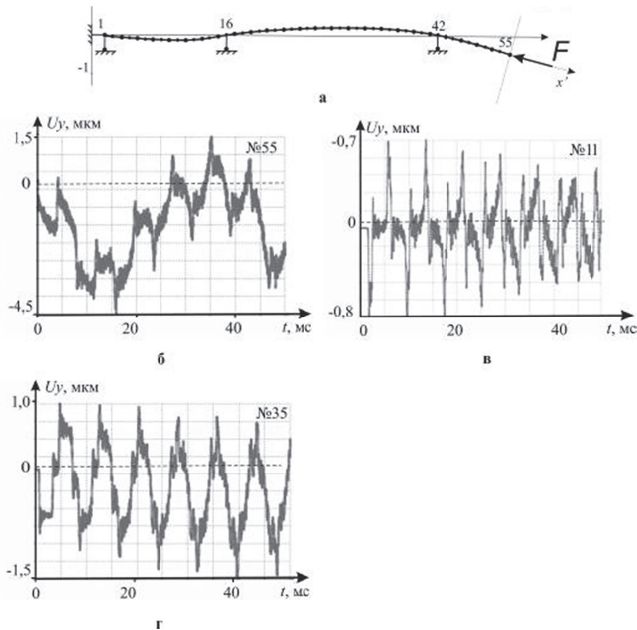


Рис. 2. Результаты расчета для Модели 3:

- а – вид деформированной модели с учетом собственного веса,
 б – перемещение в узле № 55, в – перемещение в узле 11,
 г – перемещение в узле 35

Расчетное время прихода волны до жесткой заделки для недеформированного стержня составляет 2 мс. Анализ результатов показывает, что полный период прохода волны от свободного конца до жесткой заделки для деформированной модели и обратно составляет также около 4 мс, прогиб не оказывает существенного влияния на время прохождения. Анализ перемещений для узлов 11, 35 и 55 показывает, что узлы Модели 3 отклоняются с задержкой, пропорциональной расстоянию от крайнего узла, так же, как и для Модели 1. Период колебаний узлов постоянен. Однако по сравнению с результатами, полученными для прямолинейных моделей, появляется низкочастотная мода колебаний для узлов с большим вертикальным прогибом (№ 55 и 35), колебания имеют более сложный характер, видны эффекты биения.

Данные результаты говорят об успешной верификации одномерных моделей и возможности моделирования процесса распространения акустических волн в двумерной и трехмерной постановке. Моделирование одной составляющей акустической волны продольной имеет особенности при учете физических особенностей модели и отклонения от идеальных условий.

Для отработки методики распространения волны в плоском объекте были решены тестовые задачи. В практике неразрушающего контроля в первом приближении такими объектами могут выступать сосуды, резервуары, оболочки, у которых один из размеров существенно меньше двух других. Для плоских моделей рассмотрено два варианта моделирования источника. Рассмотрим особенности распространения акустической волны в плоском объекте контроля при точечном воздействии силы F , направленной по касательной к боковой грани (Модель 5), и по нормали (Модель 6). Такое точечное приложение силы F приводит к возникновению двух разных видов фронта волны. Граничные условия и геометрические размеры представлены на рис. 3, характеристики моделей даны в табл. 3.

Для Модели 5 в момент времени $t = 40$ мкс (рис. 3, б) под воздействием нагрузки в модели формируется две зоны деформаций с разными знаками. Таким образом, при приложении силы по оси u распределение перемещений в начальный момент имеет диполь – две зоны деформаций, отрицательную и положительную зоны, что в конечном итоге влияет на фронт распространения волны, и результаты измерений датчиком АЭ. При одинаковой воздействующей силе амплитуда перемещений на порядок меньше для такой модели источника. Второй вариант моделирования источника АЭ-сигнала Модель 6, в этом случае скорость волны больше, и фронт имеет центр и расходится от него (рис. 3, г, д).

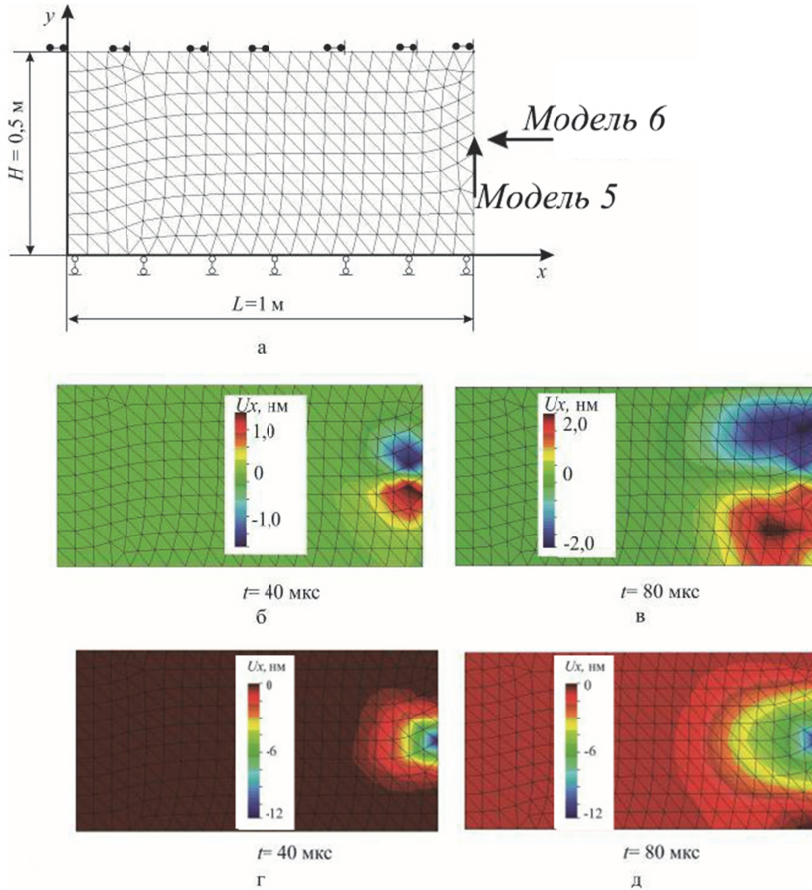


Рис. 3. Результаты расчета Моделей 5 и 6 в разные моменты времени:
a – граничные условия, б, в – распределение перемещений U_x в Модели 5,
г, д – распределение перемещений U_x в Модели 6

Таблица 3

Параметры моделей плоских объектов

Модель №	Длина, L , м	Ширина, H , м	Размер элемента, м	Колич. элементов	Колич. узлов	Тип элементов	Сила, F , кН	f , кгЦ
5	1	0,5	$5 \cdot 10^{-2}$	418	240	SHELL3	1	1
6	1	0,5	$5 \cdot 10^{-2}$	418	240	SHELL3	1	1
7	1	0,5	$5 \cdot 10^{-2}$	40 000	20 301	SHELL3	1	100

Данные результаты показывают различие при моделировании продольной и поперечной волны на плоских объектах неразрушающего контроля. Моделирование источника играет важную роль во всем процессе моделирования.

Для Модели 7 была принята модель источника, приложенного по нормали к грани, частота сигнала составила 100 кГц, что потребовало иной пространственной дискретизации. Анализ рис. 4 показывает, что для Модели 7 с пространственной дискретизацией, равной $\lambda/10$, обеспечена хорошая дискретизация для анализа процесса распространения АЭ-волны. Фронт волны продольных перемещений U_x становится четко различимым, можно проводить более детальный анализ. В Модели 7 верхняя грань закреплена (рис. 3, а), что влияет на фронт распространения.

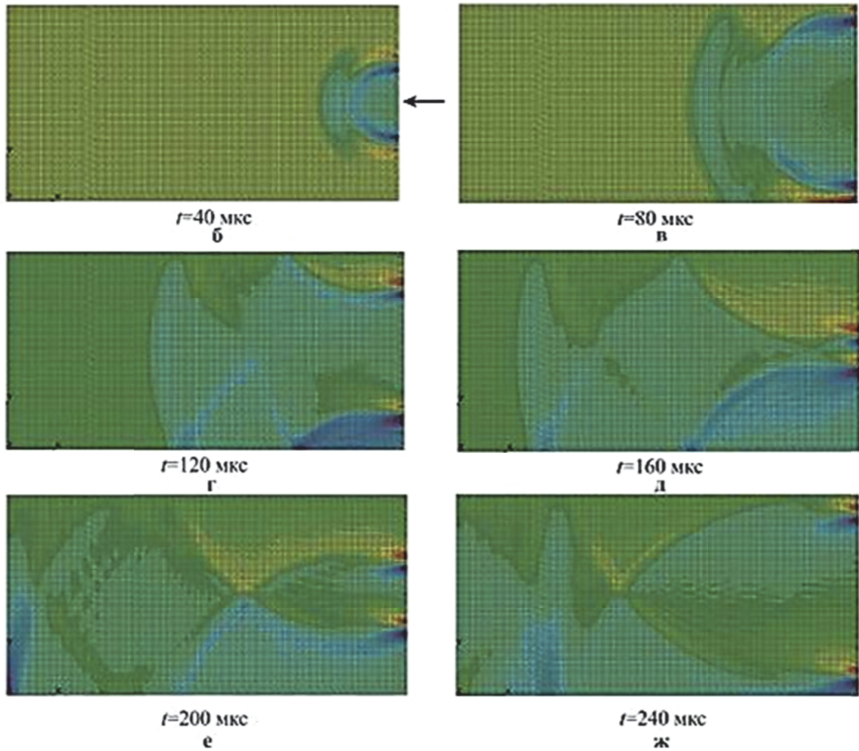


Рис. 4. Распределение перемещений U_x Модели 7 в разные моменты времени:
 а – шкала U_x Модели 7,
 б, в, г, д, е, ж – процесс распространения акустической волны в модели

Таким образом, модели с использованием предлагаемых алгоритмов учитывают влияние различных граничных условий. В момент $t = 40$ мкс фронт распространения волны еще полностью симметричный. При $t = 80$ мкс (рис. 4, *в*) волновой фронт по-разному отражается от верхней и нижней грани из-за различия граничных условий. Нижняя грань имеет запрет перемещений по оси y , продольная волна (с характерными перемещениями в направлении распространения) распространяется вдоль нее свободно. На рис. 4, *б–ж* также хорошо прослеживается фронт продольной волны, распространяющийся вдоль правой свободной поверхности, в момент времени $t = 120$ мкс (см. рис. 4, *з*) волна отражается от верхней и нижней грани и идет в обратном направлении, происходит сложение волн. В момент времени $t = 160$ мкс (см. рис. 4, *д*) отраженная от границ модели волна на правой боковой поверхности снова приближается к средней ее части. Два фронта накладываются, волна снова расходится при $t = 200$ мкс (см. рис. 4, *е, ж*) к верхней и нижней граням.

Продольная волна, распространяющаяся к левой грани, к моменту времени $t = 200$ мкс (см. рис. 4, *е*) доходит до нее и отражается. В момент времени $t = 240$ мкс (см. рис. 4, *ж*) продольная волна начинает путь в обратном направлении. Анализ модели показывает возможность моделирования распространения упругих волн деформаций в частотном диапазоне от 100 кГц в плоских объектах неразрушающего контроля.

Следующим этапом является численное моделирование процесса распространения волны в объемных объектах. При контроле объемных объектов возникает проблема оптимального расположения преобразователей при контроле [10]. Для экспериментальной части выбрана пластина с размерами $1,0 \times 1,0 \times 0,008$ м. Оборудование для эксперимента было расположено на виброизолированном столе ВИС-1. Хрупкий излом грифеля в установке для излома под определенным углом генерировал АЭ-сигнал по стандартной методике. Для сопоставления результатов физического и численного эксперимента была создана конечно-элементная модель пластины с размерами $1 \text{ м} \times 1 \text{ м}$ и толщиной 8 мм (рис. 5).

Для Модели 8 заданы характеристики стали, количество слоев по толщине – два. Расстояние от источника И до датчика Д0 составляет 781 мм, до датчика Д1 – 510 мм, Д2 и Д3 – 223,6 и 632,5 мм соответственно. Максимальная частота излучаемого сигнала равна 100 кГц. Величина прикладываемой силы – 1 кН, сила приложена по нормали к поверхности по оси z в точке И. Представлена картина изолиний перемещений U_z поверхности объекта контроля в момент времени, равный 180 мкс. Неосесимметричная картина U_z является результатом сложения волн, отраженных от боковой правой и нижней граней. Расчетное время прихода сигнала на самый отдаленный датчик составляет 150 мкс.

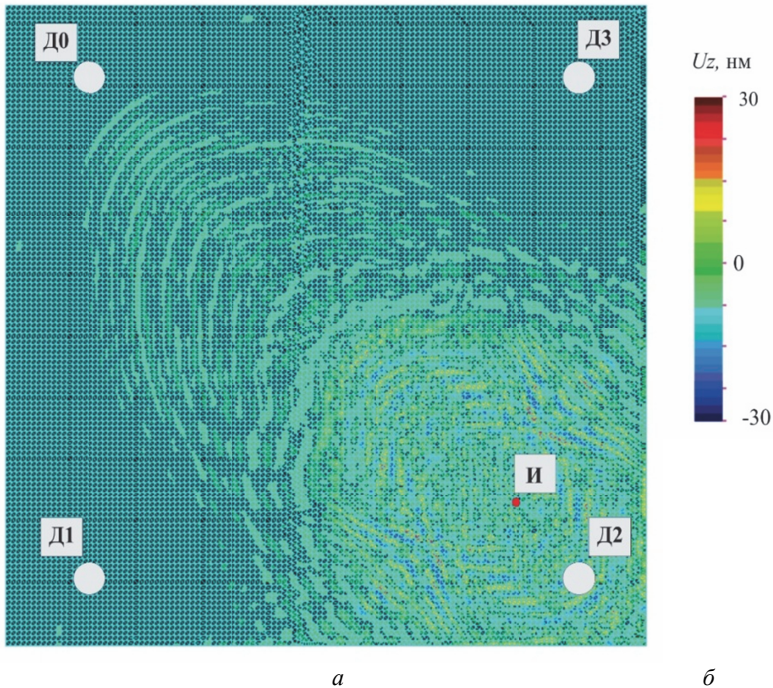


Рис. 5. Модель 8:

a – Д0, Д1, Д2, Д3 – места установки датчиков акустической эмиссии, ***И*** – излучатель акустической волны в объекте, ***б*** – поля перемещений U_z

На следующих графиках рис. 6, *a* представлены зависимости от времени перемещения U_z для каждого из узлов численной модели, в которых в физическом эксперименте установлены датчики акустической эмиссии. Из рис. 6, *a* следует, что первым по времени акустический сигнал приходит в узел 1686 модели (на этом месте находится датчик Д2), далее в узел 1518 (датчик Д1), после него волна приходит в узел 8574 (датчик Д3), далее – в узел 8406 (датчик Д0) численной модели. Таким образом, численная модель корректно отображает процесс распространения волны, и абсолютное время прихода волны в узел соответствует аналитическому решению.

На рис. 6, *б* показаны сигналы, зарегистрированные системой СЦАД-16.02 в ходе проведения физического эксперимента. Акустическая волна на ближайший датчик Д2 (канал 2 на рис. 6, *б*) приходит первой, и с некоторым запаздыванием – на более удаленные датчики, так же, как и в численной модели. Разницу абсолютного времени регистрации волны на соседних датчиках регистрирует система.

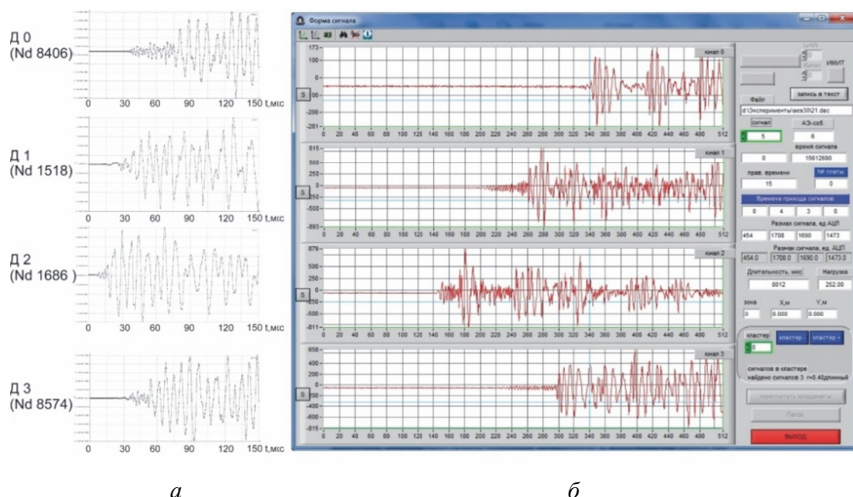


Рис. 6. Акустико-эмиссионные сигналы, полученные при физическом и при численном экспериментах:
а – численные результаты перемещения узлов с теми же координатами, что и места установки датчиков,
б – сигналы, зарегистрированные системой СЦАД-16.02

Сопоставление полученных результатов позволяет говорить о подобности сигналов, полученных численным методом и зарегистрированных в реальном эксперименте. В численном эксперименте можно выделить моды в сигнале с датчиков, а также определить абсолютное время прихода АЭ-сигнала в определенный узел. Конечно-элементная модель и анализ этапов распространения акустико-эмиссионного сигнала позволяет определить картину изолиний, сложения и наложения волн, что позволяет выносить рекомендации об оптимальном месте установки АЭ-преобразователей для сложных объектов с целью регистрации максимально эффективного уровня сигнала.

Выводы

Предложенные методы моделирования процесса распространения акустико-эмиссионной волны в объектах позволили получить результаты распространения акустико-эмиссионных волн в реальных объектах контроля пластинах толщиной 6–8 мм.

Проведена верификация численных расчетов анализа распространения акустических волн. Проведено исследование влияния пространственной и временной дискретизации при расчетах. Получены результаты численного моделирования распространения акустических волн для одномерных, двумерных и трехмерных моделях объектов контроля. Предлагается использовать численное моделирование для анализа объектов любой

геометрии при разработке и обосновании схем контроля, в том числе расположения преобразователей акустической эмиссии.

Список литературы

1. Использование метода акустической эмиссии при неразрушающем контроле объектов транспортного машиностроения / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, Е.Ю. Лебедев // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2022. № 2. С. 22–34.
2. Современные возможности метода акустической эмиссии при оценке технического состояния промышленного оборудования: обзор и схемы применения / И.А. Растегаев, И.И. Растегаева, Д.Л. Мерсон, В.И. Иванов // Контроль. Диагностика. 2024. Т. 27. № 9 (315). С. 4–23.
3. Испытания образцов из углепластика с ударными повреждениями с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, И.С. Рамазанов, А.Б. Кузнецов, В.В. Чернова // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25. № 7. С. 14–25.
4. Оценка прочности прессовых соединений колец подшипников на основе закономерностей их деформирования при нагружении / С.А. Бехер, А.А. Попков, С.П. Шляхтенков, В.С. Выплавень, В.Н. Федоринин, И.Ю. Кинжагулов // Деформация и разрушение материалов. 2025. № 3. С. 28–37.
5. Возможности идентификации дефектов в массивных литых конструкциях методами неразрушающего контроля / С.П. Шляхтенков, М.А. Гуляев, В.С. Выплавень, А.А. Попков, С.А. Бехер, А.Н. Курбатов, А.Л. Бобров // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25. № 8. С. 36–43.
6. Бехер, С.А. Временные характеристики потока сигналов акустической эмиссии при развитии трещин в стекле при ударном нагружении / С.А. Бехер, А.А. Попков // Вестник ИЖГТУ им. М.Т. Калашникова. 2019. № 1. С. 62–71.
7. Влияние предварительного циклирования на характеристики акустической эмиссии конструкционной стали 15Х2ГМФ / Л.Р. Ботвина, М.Р. Тютин, А.И. Болотников, Т.Б. Петерсен // Металлы. 2021. № 1. С. 37–48.
8. Буйло, С.И. Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики / С.И. Буйло. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2017. 184 с.
9. Gerasimov, S. Modelling of ultrasonic wave propagation through the border of two mediums / S. Gerasimov, T.V. Igumnova // Technological Advancements in Construction. Cham. 2022. Pp. 255–263.
10. Проблемы локации источников акустической эмиссии / Ю.Г. Матвиенко, И.Е. Васильев, Д.В. Чернов, В.И. Иванов, С.В. Елизаров // Дефектоскопия. 2021. № 9. С. 35–44.
11. Bekher, S.A. Development of methodology for the calculation and experimental investigation of acoustic emission signals / S.A. Bekher, T.V. Sych // AIP Conference Proceedings: Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2017). P. 020001.
12. Gerasimov, S.I. Finite element modelling of acoustic emission sensor / S.I. Gerasimov, T.V. Sych // Journal of Physics: Conference Series. 2017, Vol. 881. No. 1. P. 012003.
13. Муравьев, В.В. Скорость звука и структура металлов и сплавов / В.В. Муравьев, Л.Б. Зуев, К.Л. Комаров. Новосибирск: Наука, 1996. 184 с.

УДК 620.179.17

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОГО АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ В РЕЖИМЕ ОНЛАЙН НА ОСНОВЕ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ И БОЛЬШИХ ДАННЫХ

Се Цзехуэй¹, Лю Ятин¹, Суслов А.В.²¹QingCheng AE institute (Guangzhou) Co., Ltd, Гуанчжоу, Китай.

E-mail: lyt@ae-ndt.com, sliu@ae-ndt.com, xjh@ae-ndt.com

²Самарский государственный технический университет,
Самара, Россия

Технология акустической эмиссии, как динамический метод неразрушающего контроля в режиме реального времени, позволяет осуществлять непрерывный контроль и раннее предупреждение развития дефектов конструкций путем регистрации упругих волн, генерируемых высвобождением локальной энергии внутри материала в результате деформации и разрушений [1, 2]. В настоящей статье объединены Интернет вещей, большие данные и технологии искусственного интеллекта, на основе которых разработана и создана интеллектуальная система непрерывного акустико-эмиссионного контроля и диагностики. Система состоит из встроенного интеллектуального терминала сбора данных, облачной платформы Интернета вещей и многотерминальных интерактивных клиентских приложений, которые объединяют полную функциональную цепочку сбора сигналов в режиме реального времени, удаленную передачу данных, интеллектуальный анализ данных и визуализацию. Благодаря внедрению алгоритмов глубокого обучения [5, 6], система реализует локализацию источников акустической эмиссии с разметкой сетки [4], распознавание образов параметров/формы волн, кластерную классификацию [7] и автоматическую оценку, что значительно повышает точность и эффективность диагностического контроля. Надежность и практичность разработанной системы подтверждены на промышленных объектах, таких как контроль обрыва проволоки мостового каната, контроль коррозии днища резервуара и диагностика утечек клапанов трубопроводов. Данная система предоставляет собой интеллектуальное решение контроля безопасной эксплуатации специального оборудования и критической инфраструктуры, помогает продвигать модернизацию в отрасли неразрушающего контроля в направлении цифровизации и интеллектуализации.

Ключевые слова: диагностика, неразрушающий контроль, акустическая эмиссия, Интернет вещей, искусственный интеллект, глубокое обучение

1. Технологии акустической эмиссии

Технология акустической эмиссии возникла в середине XX века [1]. Ее основной принцип заключается в осуществлении неразрушающего контроля и оценке дефектов конструкций путем регистрации и анализа

упругих волн, возникающих внутри материала в результате таких событий, как микроразрывы, пластическая деформация или коррозия [2]. По сравнению с традиционными методами контроля, такими как ультразвуковой и радиографический контроль, технология акустической эмиссии обладает значительными преимуществами, такими как динамический контроль, комплексная оценка, отсутствие необходимости остановки оборудования и адаптивность к сложным условиям [3], поэтому она образно называется «стетоскопом материалов».

Рассмотрим основные преимущества технологии:

1. С ее помощью можно осуществлять динамический контроль оборудования в режиме реального времени – непрерывное получение информации о состоянии конструкции под воздействием многих факторов, таких как нагрузка, температура и время, непосредственно во время эксплуатации самой конструкции.

2. Данная технология осуществляет комплексную оценку, которая позволяет обследовать крупные и габаритные конструкции с использованием ограниченного количества датчиков.

3. Данная технология обладает адаптивностью к окружающей среде и может стабильно работать в среде с суровыми условиями, такими как высокие и низкие температуры, коррозионная среда, легковоспламеняющаяся среда и взрывоопасная среда.

4. Технология может применяться не только для обнаружения дефектов, но и для оценки их активности и тенденции развития, обеспечивая основу для прогнозирования технического обслуживания.

В последние годы стремительное развитие Интернета вещей, технологий облачных вычислений и технологий искусственного интеллекта [8, 9] открыло новый путь для интеллектуальной модернизации акустико-эмиссионного контроля. Внедрение технологии Интернета вещей коренным образом изменило традиционную модель контроля. Ее основное преимущество заключается в том, что с ее помощью можно осуществлять непрерывный онлайн-контроль, удаленный контроль и контроль без участия персонала. Благодаря встроенному сбору данных, беспроводной передаче данных, хранению данных на облачной платформе и глубинному обучению и анализу, можно реализовать автоматизацию и интеллектуализацию всего процесса от регистрации сигналов до диагностики неисправностей. Основываясь на этой концепции, в статье рассматривается созданная интеллектуальная платформа непрерывного акустико-эмиссионного контроля (в режиме онлайн), охватывающая все звенья «сбор данных – передача данных – анализ данных – раннее предупреждение о дефектах». Система предназначена для повышения уровня управления безопасностью и эффективностью эксплуатации и технического обслуживания промышленного оборудования.

2. Система непрерывного акустико-эмиссионного контроля на основе Интернета вещей

Рассматриваемая в данной статье система, основана на архитектуре Интернета вещей, предполагающей взаимодействие «терминал сбора сигналов – Интернет вещей – клиентский терминал» [9]. Система представляет собой замкнутый контур, состоящий из интеллектуального терминала сбора сигналов, облачной платформы Интернета вещей и многотерминальных приложений, обеспечивающего охват всего процесса от восприятия, передачи и анализа данных до интеллектуального принятия решений. Схема системы представлена на рис. 1. Преимущество системы непрерывного акустико-эмиссионного контроля на основе Интернета вещей по сравнению с традиционными системами акустико-эмиссионного контроля заключается в том, что она может работать в удаленном онлайн-режиме без участия персонала.

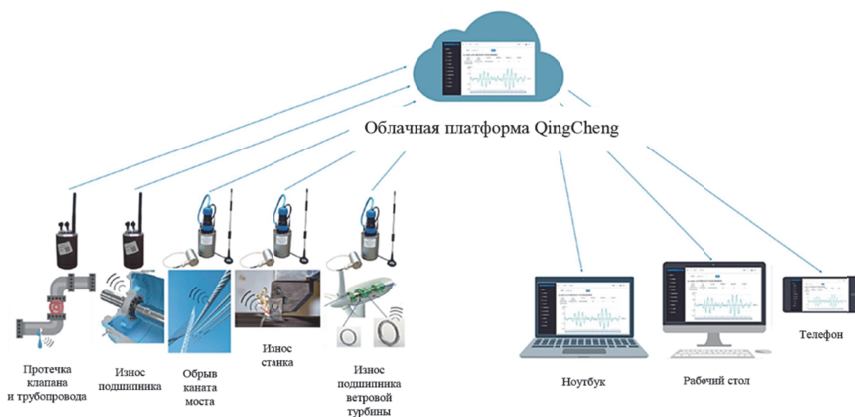


Рис. 1. Схема архитектуры системы непрерывного акустико-эмиссионного контроля

В качестве ядра системы терминал сбора и регистрации сигналов акустической эмиссии использует высокоинтегрированную встроенную системную конструкцию, которая объединяет акустические датчики, усилители сигналов, модули сбора данных, блоки обработки и модули связи. Его компактная конструкция облегчает установку на исследуемой конструкции. Для адаптации к различным промышленным сценариям, терминал предлагает разные модели, включая беспроводную синхронную версию с функцией Wi-Fi/GPS, искробезопасную взрывозащищенную версию и интегрированную версию для мониторинга акустической эмиссий и вибраций.

Терминал обладает возможностью локальной интеллектуальной обработки [8], которая позволяет установить признаки и провести предварительную диагностику собранных сигналов акустической эмиссии в режиме реального времени, что, в свою очередь, снижает нагрузку на вычисления и передачу данных на облачной платформе. В то же время его конструкция с низким энергопотреблением поддерживает аккумуляторное питание и питание солнечной энергией, что обеспечивает стабильную работу в условиях отсутствия внешнего электропитания.

Уровень Интернета вещей отвечает за соединение терминала сбора сигналов с различными клиентскими терминалами, образуя сеть связи системы. Система использует различные формы сети: проводные и беспроводные сети, такие как Wi-Fi, 4G, LoRa и Bluetooth. Разработанная компанией облачная платформа Qingcheng содержит богатый набор функций визуализации данных и отчетности, такие как экран контроля в реальном времени, анализ кривых тренда, запрос журнала аварийных сигналов и удаленная конфигурация параметров терминала сбора сигналов. Все это позволяет быстро и надежно оценить состояние оборудования. Кроме того, платформа поддерживает многопользовательское и детализированное управление правами доступа для различных предприятий, проектов и пользователей, что обеспечивает сохранность и конфиденциальность данных.

Уровень клиентских приложений обеспечивает удобный доступ и эффективное взаимодействие с информацией о мониторинге, поддерживает программное обеспечение для анализа на терминале ПК, мобильном приложении, веб-платформах и специальном приложении, на основе протоколов связи. Это позволяет пользователям осуществлять удаленный мониторинг и контроль в режиме реального времени в любое время и в любом месте, используя различные каналы. Когда система обнаруживает аномалию, она своевременно отправляет аварийный сигнал по различным каналам, таким как SMS, электронная почта и push-уведомление в приложении. Для эксплуатации и технического обслуживания на месте клиентское приложение поддерживает подключение при помощи Bluetooth для проверки оборудования и настройки параметров, что значительно повышает эффективность работы.

3. Пять основных функциональных модулей ИИ для глубокого обучения

Касаемо обработки и анализа данных система интегрирует акустико-эмиссионную рабочую станцию Qingcheng Sound Transmission AI, которая оснащена высокопроизводительным сервером и программным обеспечением с пятью основными функциями анализа ИИ, разработанными компанией Qingcheng. Рабочая станция использует графическую карту NVIDIA

RTX4090 и программное обеспечение CUDA 12.4 для достижения высокой эффективности параллельных вычислений.

3.1. Локализация источников акустической эмиссии с помощью сетки (Grid Annotation Location, GAL)

Традиционные методы локализации источников акустической эмиссии основаны на расчете разности во времени регистрации акустической эмиссии. Расчет осуществляется на основе разности во времени получения сигналов несколькими датчиками с заданным пространственным расположением и известной скоростью звука. Таким образом, положение источника акустической эмиссии рассчитывается по геометрическим соотношениям. Однако в случае сложных конструкций, анизотропии материалов, неравномерного распределения скорости звука или изменяющихся граничных условий, с применением традиционного метода трудно построить точные математические модели, что приводит к снижению точности локализации или даже к сбою.

В связи с этим предлагается новый метод локализации источников акустической эмиссии, основанный на разметке сетки и глубоком обучении – локализация источника акустической эмиссии с разметкой сетки (GAL). С помощью данного метода можно осуществлять точную локализацию без сложного математического анализа [4]. Основной процесс метода включает в себя:

1. Разделение поверхности исследуемой конструкции на плотную сетку и использование источника акустической эмиссии в каждом узле сетки для сбора данных меток.
2. Использование полученных сеток для обучения модели искусственного интеллекта и построения моделей локализации.
3. Применение обученной модели для локализации источников акустической эмиссии.

Данный метод значительно повышает точность локализации.

3.2. Распознавание волновых форм/параметрических образов (Waveform/Parameter Pattern Recognition, WPR/PPR)

Распознавание параметрических образов относится к распознаванию образов с использованием характеристических параметров акустической эмиссии для повышения точности анализа данных. Распознавание волновых форм относится к эффективной классификации и распознаванию исходных форм волн акустической эмиссии непосредственно с помощью технологии глубокого обучения [5]. Например, формы волн акустической эмиссии в процессе растрескивания, столкновения посторонних предметов, слома грифеля карандаша и т. п.

Функциональный модуль распознавания образов использует искусственную нейронную сеть [6], которая вычисляет образы посредством взвешенного суммирования и функции активации. Обучение выполняется с применением большого количества данных для создания конкретной модели распознавания. Например, данные параметров с известными категориями вводятся в модель распознавания параметров (PPR), разработанную компанией Qingcheng, для обучения, с целью получения модели распознавания параметров. После ввода тестовых данных в модель распознавания параметров можно получить результаты классификации. На рис. 2 представлен график результатов оценки обучения модели.



Рис. 2. График результатов оценки надежности при обучении модели

3.3. Классификация источников акустической эмиссии на основе кластеризации параметров/форм волн (Parameter/Waveform Clustering Source Separation, PCSS/WCSS)

Классификация источников акустической эмиссии на основе кластеризации параметров (PCSS) и классификация источника акустической эмиссии на основе кластеризации форм волн (WCSS) относятся к методам машинного обучения без учителя. При применении метода PCSS кластеризация осуществляется на основе характеристик параметров. PCSS подходит для быстрой предварительной проверки больших объемов данных. При применении метода WCSS кластеризация осуществляется на основе характеристик формы волны, что позволяет выделить различные типы источников акустической эмиссии, таких как трение, утечка, трещины и т. п.

При помощи данной функции входные неизвестные образы (данные параметров или формы волн) классифицируются в соответствии с их характеристиками. После того, как пользователь вводит данные и устанавливает количество кластеров, алгоритм случайным образом выбирает начальный центр кластера, затем назначает каждую точку данных ближайшему кластеру в соответствии с евклидовым расстоянием и итеративно обновляет центр кластера до сходимости и, в конечном итоге, выводит результат кластеризации [7]. Схема распределения результатов кластеризации представлена на рис. 3.



Рис. 3. Схема распределения результатов кластеризации при применении методов PCSS (слева) и WCSS (справа)

3.4. Автоматическая оценка и сигнализация

Автоматическая оценка выполняется на основе характеристических параметров, которые пользователь устанавливает для формирования уровня активности, уровня интенсивности и комплексного уровня, которые соответствуют определенным стандартам или сценариям применения. Программное обеспечение автоматически определяет результат без участия технического персонала. Облачная платформа Qingcheng может в режиме реального времени передать информацию о тревоге с помощью SMS, электронной почты и другими способами в соответствии с характеристическими параметрами, такими как интенсивность сигнала и активность, в сочетании с предустановленными пользователем критериями оценки, обеспечивая автоматическое интеллектуальное раннее предупреждение.

4. Примеры применения в промышленности

4.1. Мониторинг обрыва проволок мостового каната

Конструкции мостового каната (такие как канаты подвесных мостов, канаты вантовых мостов, подвески арочных мостов и др.) в течение длительного времени подвергаются большим нагрузкам и влиянию коррозии от окружающей среды, коррозии под напряжением и другим факторам, которые могут привести к обрыву проволок и, в последствие, к обрыву каната. В момент обрыва проволок каната генерируются упругие волны, которые распространяются вдоль стального каната к установленному на нем датчику акустической эмиссии. Блок сбора сигналов обрабатывает и анализирует принятые сигналы, извлекает эффективные характеристики обрыва проволок каната и осуществляет мониторинг состояния обрыва проволок каната. Точность распознавания обрыва проволок каната системой достигает 100 %, без пропущенных и ложных срабатываний, что соответствует требованиям «Технических правил контроля конструкций автодорожных мостов JT/T 1037-2022» [10].

На заводе по производству мостовых канатов было проведено четыре испытания на обрыв проволок каната на полноразмерных подвесках мостов (рис. 4). Первое испытание было предварительной проверкой для настройки параметров системы, последующие испытания были испытаниями для контроля и проверки. Общее количество стальных проволок составляет 133, а фактическое количество сломанных проволок в четырех испытаниях составляет 7, 8, 9 и 9 соответственно (см. таблицу).

Таблица результатов испытаний на обрыв проволок мостовых канатов

Номер испытания	Количество оборванных проволок, обнаруженных облачной платформой	Совокупное количество оборванных проволок	Процент обрыва проволок	Точность сигнализации	Уровень работоспособности	Предельный уровень
1	7	7	5,26 %	100 %	III	Уровень 2
2	8	15	11,27 %	100 %	III	Уровень 2
3	9	24	18,04 %	100 %	III	Уровень 2
4	9	33	24,81 %	100 %	III	Уровень 2

Согласно данным облачной платформы, в ходе первого предварительного испытания было успешно обнаружено 7 оборванных проволок каната. Такие параметры, как амплитуда сигнала, среднеквадратичное значение (RMS), уровень звукового давления (ASL) и энергия, были намного выше нормальных значений, что подтвердило рациональность выбора критерия оборванных проволок. В последующих трех испытаниях

точность определения количества оборванных проволок системы составила 100 %, без пропущенных и ложных срабатываний.

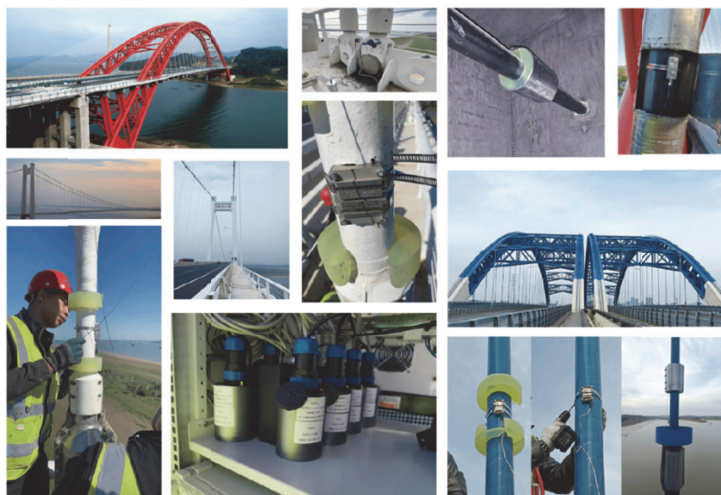


Рис. 4. Пример установки устройств контроля акустической эмиссии мостовых канатов

Интеллектуальная система мониторинга акустической эмиссии RAEMI была успешно применена на десятках мостов в Китае, таких как Радужный мост в городе Шэньчжэн, мост Фуронг, мост Тайпинху в провинции Аньхой, мост через реку Янцзы в городе Мааньшань и серия проектов по отводу воды из реки Янцзы в реку Хуайхэ. Применение системы позволило осуществить непрерывный мониторинг в режиме реального времени обрыва проволок в ключевых частях, таких как натяжной канат, подвески, анкерные соединения и сварные швы. Система поддерживает сбор сигналов на расстоянии до 40 метров и может передавать сигналы в режиме реального времени через интеллектуальный терминал, обеспечивая надежную техническую поддержку для мониторинга состояния конструкции моста и профилактического обслуживания.

4.2. Мониторинг коррозии днища резервуара

Коррозия днища резервуара приводит к истончению и разрушению конструкции, вызывая протечки. Согласно статистике, отказы, вызванные коррозией, составляют более 60 % от общего объема отказов резервуаров. Поэтому эффективный контроль резервуаров имеет большое значение для безопасного производства, экономии ресурсов и защиты окружающей среды.

При наличии коррозионных дефектов на днище резервуара под действием нагрузки жидкости локальная небольшая деформация материала приводит к отслаиванию продуктов коррозии, создавая сигналы акустической эмиссии. С помощью технологии акустической эмиссии осуществляются локализация и оценка интенсивности коррозионной активности, что соответствует государственным стандартам JB/T 10764-2023 «Неразрушающий контроль – метод акустико-эмиссионного контроля и оценки металлических резервуаров, работающих под атмосферным давлением» [11], NB/T 47013-2015 «Неразрушающий контроль оборудования, работающего под давлением» и международному стандарту ISO 24489. Данная технология подходит для контроля коррозионного износа днища надземного вертикального резервуара, для рабочей среды в виде газа или жидкости, а рабочее давление составляет нормальное атмосферное давление или давление менее 0,1 МПа. Пример применения системы АЭ-контроля коррозии днищ резервуаров представлен на рис. 5.

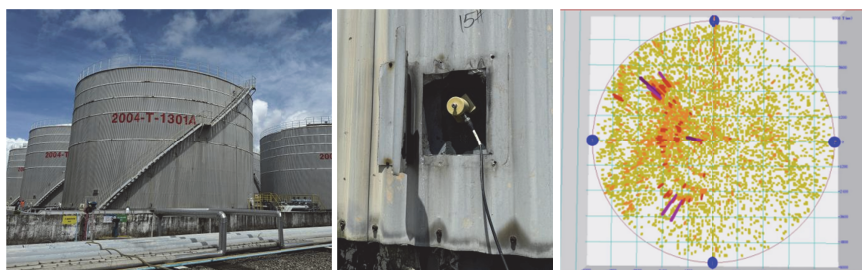


Рис. 5. Пример акустико-эмиссионного контроля коррозии резервуара

Сигналы коррозионной активности контролируются в режиме реального времени путем расположения датчиков в нижней части наружной стенки резервуара. Данные могут передаваться в режиме реального времени на программное обеспечение или в облачную платформу Qingcheng. Платформа автоматически генерирует отчет о мониторинге и состоянии резервуара в соответствии с вышеуказанными стандартами и информацией, введенной персоналом, и одновременно отправляет информацию о степени износа обслуживающему персоналу.

4.3. Диагностика утечек в трубопроводах

В процессе длительной эксплуатации клапанов и трубопроводов могут появляться внутренние или внешние утечки из-за повреждения уплотнений, старения компонентов или в связи с несвоевременным техническим обслуживанием, что в конечном итоге может привести к серьезным авариям.

Когда среда в трубопроводе или внутри клапана проходит через точку утечки, вследствие трения, генерируются акустические волны, которые распространяются вдоль стенки трубопровода и принимаются датчиком акустической эмиссии. После того как блок сбора сигналов проанализирует и обработает полученный сигнал, он отправляет данные на облачную платформу через сеть 4G/Wi-Fi. Пользователи могут войти на платформу в любое время, чтобы просмотреть данные в режиме реального времени и данные за выбранный временной период. Платформа проводит логические проверки в соответствии с предустановленными критериями и отправляет результаты в режиме реального времени на компьютер, мобильный телефон, электронную почту или SMS-сообщение. Установив количественную взаимосвязь между скоростью утечки и характеристическими параметрами акустической эмиссии (такими как ASL), система может осуществлять оценку степени утечки в режиме реального времени и прогнозирование развития во времени, а также поддерживать непрерывный мониторинг в течение 365 дней и инспекцию на мобильных приложениях с помощью Bluetooth (рис. 6, 7).

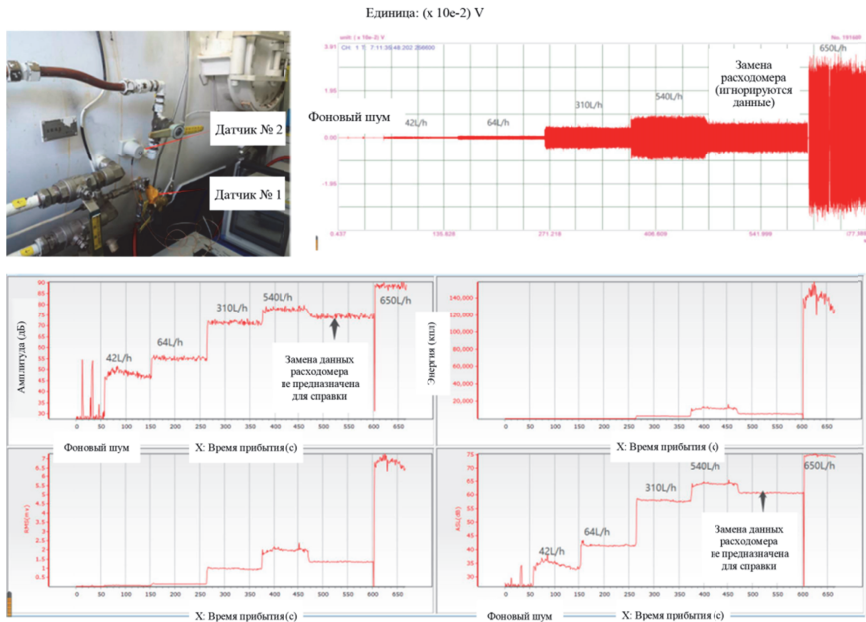


Рис. 6. Схема установки устройства для испытания на утечки клапана. Диаграмма формы сигнала и диаграмма корреляции параметров



Рис. 7. Схема установки системы для контроля утечек

4.4. Мониторинг состояния и работоспособности системы

Системы акустико-эмиссионного контроля также широко используются для мониторинга состояния конструкций и оборудования.

С целью проверки точности метода GAL с сочетанием акустической эмиссии и глубокого обучения, в данном исследовании в качестве примера используется ключевой компонент в гидротехническом затворе – шарнирно-подвижная опора дугового затвора. Указанный компонент может быть поврежден из-за усталости, износа или коррозии при длительной эксплуатации, генерируя сигналы акустической эмиссии при наличии напряжений. Точное распознавание местоположения источника акустической эмиссии имеет большое значение для своевременного выявления угроз безопасности и оценки эксплуатационного состояния оборудования.

Экспериментальная конструкция выполнена по следующей схеме: 10 датчиков расположены на шарнирно-подвижной опоре размером $2,6 \times 2,8 \times 3,0$ м, а поверхность шарнирно-подвижной опоры разделена на 229 ячеек сетки, охватывающих переднюю, заднюю, левую и правую боковые стороны (рис. 8). Всего было выполнено 13633 идентификации. На рис. 9 (слева) указана термодинамическая диаграмма матрицы ошибок результатов идентификации, где горизонтальная и вертикальная оси соответствуют 229 ячейкам сетки. Вертикальная ось обозначает реальную категорию, а горизонтальная ось обозначает прогнозируемую категорию. Зоны без результатов прогнозирования на диаграмме отображаются черным цветом, а зоны с результатами прогнозирования показывают количество распознаваний в цветовом градиенте. На рисунке можно увидеть, что результаты распознавания сосредоточены в узкой зоне в виде полосы вблизи диагонали, что указывает на хорошее совпадение прогнозируемого значения с истинным значением.



Рис. 8. Схема разделения сетки на шарнирно-подвижной опоре затвора

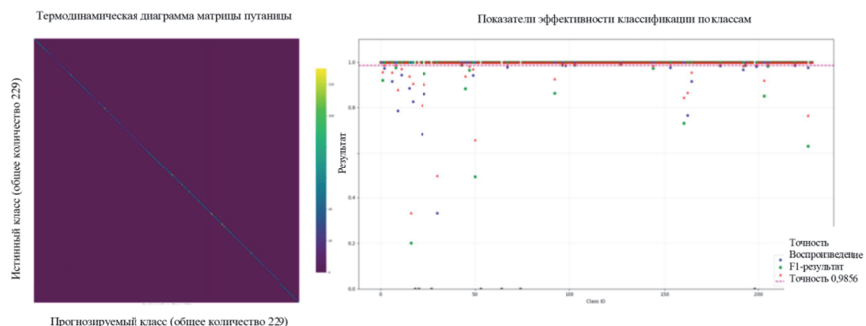


Рис. 9. Термодинамическая диаграмма матрицы ошибок результатов распознавания (слева) и диаграмма рассеяния показателей оценки модели (справа)

Общая точность модели в тестовом наборе достигла 98,56 %, что демонстрирует высокую точность модели, полноту и балл F1. Модель может точно определить положение большинства источников акустической эмиссии, а частота ложных срабатываний чрезвычайно низкая.

При возникновении трещин, в результате износа и разрушений, конструкции и оборудование генерируют сигналы акустической эмиссии. Система регистрирует и анализирует данные акустические сигналы, тем самым оценивая состояние конструкции. Например, применение данной системы на ключевых компонентах, таких как лопасти ветряных турбин, башни, подшипники и болты, или в таких деталях, как подвижные направляющие лопатки, серводвигатели, болты и другие части гидроэлектростанции,

позволяет реализовать раннее обнаружение трещин, износа, ослабления конструкций и другие неисправности. Кроме того, датчики акустической эмиссии, установленные на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах, могут контролировать износ инструмента, сколы лезвия и разрушение режущих инструментов в режиме реального времени, тем самым реализуя прогнозирование срока службы режущих инструментов и обеспечение качества обрабатываемых деталей.

Заключение

В данной работе представлена разработанная комплексная система непрерывного акустико-эмиссионного контроля и диагностики неисправностей на основе Интернета вещей, больших данных и технологии искусственного интеллекта. Система объединяет встроенный интеллектуальный терминал сбора сигналов, облачную платформу Интернета вещей и много-терминальные интерактивные клиентские приложения, и реализует регистрацию в реальном времени, удаленную передачу, интеллектуальный анализ и визуализацию сигналов акустической эмиссии. Благодаря внедрению алгоритмов глубокого обучения система обладает такими основными функциями, как локализация акустической эмиссии с разметкой сетки, распознавание образов параметров/формы волн, кластерная классификация без учителя, а также автоматическая оценка неисправностей и отправка уведомлений о состоянии, что значительно повышает точность и эффективность мониторинга.

Практическое применение во многих промышленных сценариях, таких как контроль обрыва проволоки мостового каната, контроль коррозии днища резервуара, диагностика утечек клапанов трубопроводов, показывает, что данная система обладает высокой надежностью и практичностью, удовлетворяет потребности долгосрочного непрерывного контроля в сложных условиях, предоставляет интеллектуальное и цифровое решение для безопасной эксплуатации специального оборудования и критических объектов инфраструктуры.

Список литературы

1. Acoustic Emission Testing / C.U. Grosse, M. Ohtsu (eds.). Springer Berlin Heidelberg, 2008.
2. Pollock, A.A. Classical wave theory in practical acoustic emission testing / A.A. Pollock // Progress in Acoustic Emission 1. 1984. Pp. 708–721.
3. Sikorski, W. Acoustic Emission: Research and Applications / W. Sikorski. Rijeka: InTech, 2013.
4. A machine learning approach for locating acoustic emission / N.F. Ince, C.-S. Kao, M. Kaveh, A. Tewfik // Mechanical Systems and Signal Processing. 2010. Vol. 24 (1). Pp. 78–89.

5. Hochreiter, S. Long short-term memory / S. Hochreiter, J. Schmidhuber // *Neural Computation*. 1997. Vol. 9 (8). Pp. 1735–1780.
6. LeCun, Y. Deep learning / Y. LeCun, Y. Bengio, G. Hinton // *Nature*. 2015. Vol. 521. Pp. 436–444.
7. Jain, A.K. Data clustering: 50 years beyond k-means / A.K. Jain // *Pattern Recognition Letters*. 2010. Vol. 31 (8). Pp. 651–666.
8. Edge computing: Vision and challenges / W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, L. Xu // *IEEE Internet of Things Journal*. 2016. Vol. 3 (5). Pp. 637–646.
9. Atzori, L. The Internet of Things: A survey / L. Atzori, A. Iera, G. Morabito // *Computer Networks*. 2010. Vol. 54 (15). Pp. 2787–2805.
10. Ministry of Transport of the People's Republic of China. JT/T 1037-2022. Technical specification for highway bridge structural monitoring. Beijing: China Communications Press. 2022.
11. China Machinery Industry Federation. JB/T 10764-2023. Non-destructive testing – Acoustic emission testing and evaluation method for atmospheric metal storage tanks. Beijing: China Machine Press. 2023.

УДК 681.518.5

О ЦИФРОВОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ СИГНАЛОВ

Науменко А.П.^{1а}, Кудрявцева И.С.^{1,2б}, Бурда Е.А.^{2в}

¹Омский государственный технический университет, Омск, Россия

²ООО «ВС инжиниринг», Омск, Россия

^аE-mail: apnaumenko@omgtu.ru, ^бE-mail: s_iren@mail.ru, ^вE-mail: banmail@rambler.ru

Представлены результаты моделирования процесса восстановления сигнала на выходе цифро-аналогового преобразователя с использованием фильтра нижних частот при различных значениях передискретизации. В качестве мер близости восстановленного и исходного сигналов использовались такие оценки как квадрат коэффициента корреляции Пирсона R^2 , погрешность восстановления гармонических составляющих сигнала и его среднего квадратичного значения, коэффициенты гармонических и нелинейных искажений. Установлено, что для восстановления различных видов сигналов (случайных и детерминированных) частоту дискретизации необходимо выбирать не менее чем в 8 раз больше максимальной частоты в спектре сигнала, при условии, что его частотный диапазон ограничен, что обеспечивает погрешность восстановления спектральных составляющих во всем диапазоне частот не более 5 % и формы сигнала с R^2 не менее 0,98. Увеличение частоты дискретизации до 30-кратного превышения максимальной частоты в спектре сигнала позволит получить погрешность восстановления спектральных составляющих во всем диапазоне частот не более 0,4 %. Полученные данные актуальны при аппаратурном цифро-аналоговом преобразовании различных видов акустических сигналов.

Ключевые слова: теорема Котельникова, теорема отсчетов, дискретизация, интерполяция, погрешность восстановления, квадрат коэффициента корреляции Пирсона, акустический, акустико-эмиссионный, виброакустический

Цифровая обработка сигнала является основой получения информации о числовых и функциональных характеристиках физических процессов.

Специалистам радиосвязи, радиоэлектроники и измерительной техники, а также других смежных областей науки и техники хорошо знакома «теорема отсчетов», именуемая в отечественной литературе теоремой Котельникова.

Инженер Котельников В.А., ставший академиком в СССР, в 1933 г. доказал семь теорем, две из которых являются основополагающими, а остальные их дополняют и конкретизируют. И казалось бы, что проблема дискретизации была решена [1, 2].

Однако профессор Худяков Г.И. отмечает, что «полное решение проблемы дискретизации для всевозможных классов аналоговых сигналов далеко от завершения. Это не позволяет радиоинженерам всегда правильно и уверенно использовать «теорему отсчетов» при разработке различных цифровых радиоэлектронных компонентов и применении в них цифровой обработки сигналов различных классов» [3].

В одной из последних работ в этой области, опубликованной профессором Вешкурцевым Ю.М. [5], приведены оценки точности восстановления случайных гауссовских процессов в зависимости от частоты дискретизации. Согласно результатам исследований [5] частоту дискретизации F_d случайных процессов для сохранения точности их вероятностных числовых и функциональных характеристик следует выбирать с запасом до пятикратного значения частоты дискретизации – $5F_d$.

Оценки погрешности восстановления сигнала при ступенчатом и линейной интерполяции рассмотрены в [4, с. 26], где показано, что для погрешности 10 % при ступенчатой интерполяции частота дискретизации должна быть $F_d = 5,23 \cdot 2F_B$, а при линейной интерполяции – $F_d = 2 \cdot 2F_B$ [4]. Здесь F_B – частота Найквиста, которая имеет значение немного меньше чем $0,5F_d$.

Целью исследований являлось определение влияния значения частоты дискретизации на числовые и функциональные характеристики сигнала, представляющего собой моногармонический и полигармонический процессы, а также восстановление достоверной формы сигнала, которая во многих случаях определяет состояние объекта контроля [8, 9, 10, 11]. В качестве критериев сравнения использовались такие оценки как относительная погрешность среднего квадратичного значения (СКЗ) или амплитуды гармонической составляющей сигнала, квадрат коэффициента корреляции Пирсона эталонного и восстановленного сигналов (R^2), коэффициенты нелинейных [6] и гармонических [7] искажений сигнала. Предполагается, что сигнал преобразуется в цифровой (дискретный) вид при помощи аналого-цифрового преобразователя и восстанавливается с помощью цифро-аналогового преобразователя с учетом ограничения по длительности выборки и неограниченном спектре сигнала.

Для упрощения исследований и возможности дальнейшей экспериментальной проверки полученных результатов применялись следующие частоты дискретизации: 48, 96, 192, 368, 768 кГц, которые можно реализовать стандартными средствами обработки аудиосигналов. При заданной частоте дискретизации количество отсчетов выборки составляла от 2^{18} до 2^{20} (от 262144 до 1048576) для эталонного сигнала и от 2^{15} до 2^{17} (от 32768 до 131072) отсчетов для исследуемого сигнала.

Алгоритм обработки сигналов при проведении исследований заключался в формировании гармонического или полигармонического сигналов аналогично аналого-цифровому преобразованию (АЦП) с заданной частотой дискретизации, восстановлению сигнала с помощью модели цифро-аналогового преобразования (ЦАП), фильтрации восстановленного сигнала с помощью фильтров нижних частот (ФНЧ) и сравнению числовых характеристик эталонного и восстановленного сигналов. Для имитирования ФНЧ во временной области имитировалась переходная характеристика фильтра путем интерполяции на 2^n интервалах между двумя отсчетами восстанавливаемого сигнала. Для сравнения использовалась и линейная интерполяция восстанавливаемого сигнала (рис. 1).

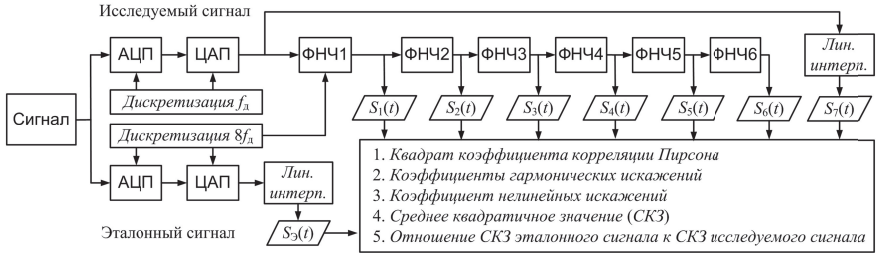


Рис. 1. Алгоритм генерирования, восстановления и обработки сигнала

Рассмотрим полигармонический сигнал, который имитирует случайный процесс путем суммирования семи частот номиналами 1277, 5333, 7177, 11177, 13177, 17333, 19121 Гц, которые составляют ряд простых чисел (рис. 2).

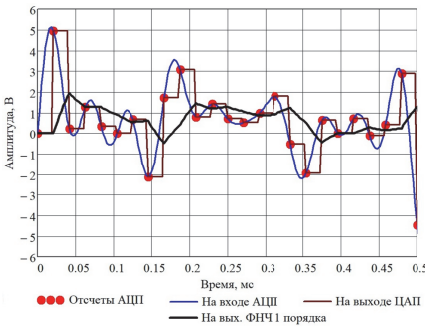


Рис. 2. Сигнал $f_d = 48$ кГц

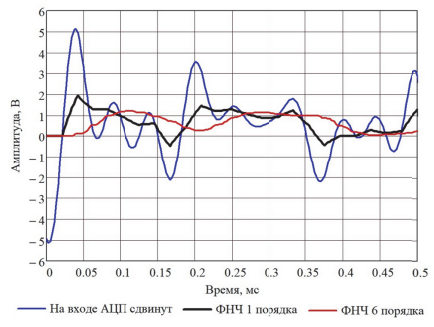


Рис. 3 Сигнал $f_d = 48$ кГц

Синей линией показан исходный (эталонный) сигнал с частотой дискретизации $f_d = 192$ кГц, отсчеты АЦП (красные маркеры) и сигнал на выходе ЦАП (коричневая линия) с $f_d = 48$ кГц. Выходной сигнал после ФНЧ первого порядка – черная линия.

Видно, что сигнал на выходе ЦАП задержан на один отсчет, что потребовало при оценке R^2 сдвинуть исходный сигнал на один отсчет (рис. 3). На рис. 3 красной линией показ сигнал после ФНЧ шестого порядка.

Из приведенных графиков видно, что при $f_d = 48$ кГц восстановленный сигнал (после ФНЧ) весьма отдаленно напоминает исходный, хотя требования теоремы отсчетов удовлетворены. Здесь следует отметить, что сигнал после ЦАП восстанавливался путем интерполяции переходной характеристикой ФНЧ первого порядка (и до шестого последовательно, что позволило получить набор сигналов после ФНЧ) на восьми интервалах.

То есть фактически в цифровом виде была проведена передискретизация сигнала.

При повышении f_d до 192, 384 и 768 кГц визуально сигналы все больше приближаются к исходному (рис. 4, 5). Однако сигналы с такими заданными частотами (простые числа) сложно анализировать в спектральной области (увеличивается время расчета спектров (до десятков минут и даже часов), происходит размывание спектральных составляющих, которые точно не попадают на частоты ряда) и поэтому для дальнейших расчетов был использован ряд частот (1125, 4125, 8250, 11625, 16125, 20250, 23625 Гц), номиналы которых точно попадали в сетку частот при всех частотах дискретизации.

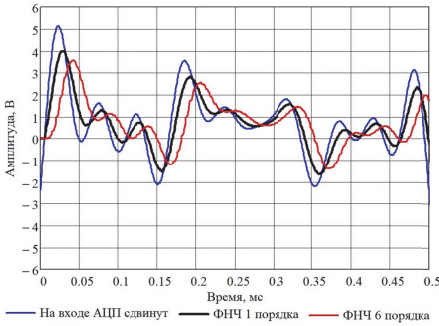


Рис. 4. Сигнал $f_d = 192$ кГц

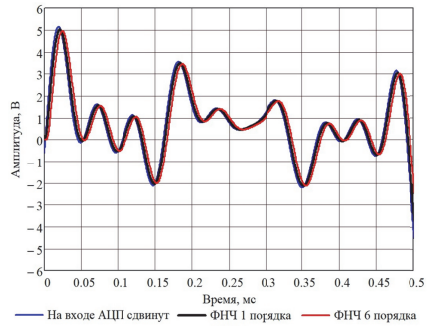


Рис. 5. Сигнал $f_d = 768$ кГц

Спектральный анализ восстановленных сигналов (рис. 6, 7) показывает уменьшение значений спектральных составляющих с увеличением их номиналов по мере приближения к $0,5f_d$. При этом даже визуально заметно, что наивысшая частота в восстановленном сигнале наполовину меньше составляющей в исходном. Таким образом при восстановлении сигнала получили потерю информации в высокочастотной части спектра сигнала, что объясняет некоторые явления, которые наблюдались при анализе различных АЭ и виброакустических сигналов.

Количественная оценка потери информации получена путем расчета коэффициентов гармонических (рис. 8) и нелинейных (графики мало отличаются) искажений. Однако искажения свыше 30 % при $f_d = 48$ кГц сильно огорчают и формируют аргументы о недостаточности такой f_d для регистрации сигналов.

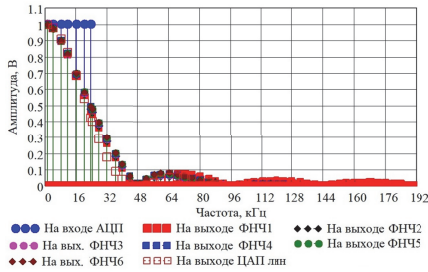


Рис. 6. Спектр линейный

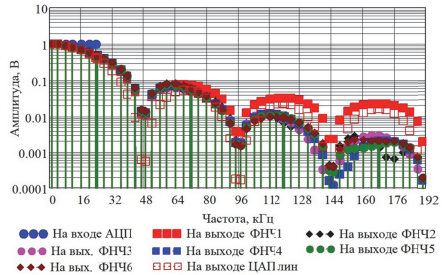


Рис. 7. Спектр логарифмический

Еще одним критерием сравнения являлось отношение амплитуды (или СКЗ) спектральной или гармонической (во временной области для моногармонических сигналов) составляющей (рис. 9). Моделирование показало, что отношение может достигать 2,5 раз для составляющих, близких к половине f_D (рис. 10). Таким образом, погрешность восстановления сигнала с частотой 20250 Гц менее 1% возможна при $f_D = 384$ кГц, а при $f_D = 768$ кГц эту частоту можно восстановить с погрешность менее 0,25%.

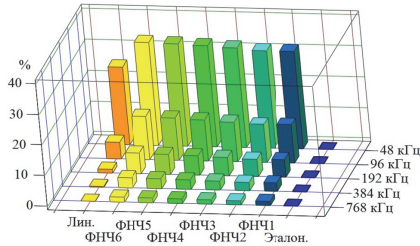


Рис. 8. Коэффициент гармонических искажений

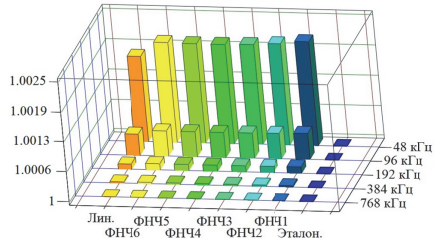
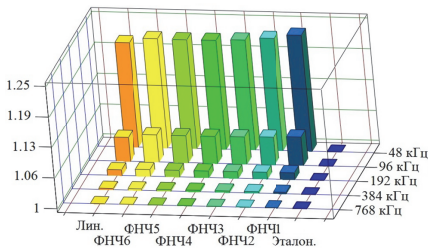
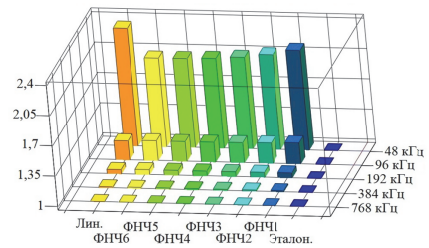


Рис. 9. Отношение амплитуд с $f = 1125$ Гц



а) $f = 11625$ Гц



б) $f = 23625$ Гц

Рис. 10. Отношение амплитуд эталонного сигнала к восстановленному

Сложнее дело обстоит с восстановлением полигармонического сигнала (рис. 11). Восстановить сигнал с погрешностью менее 1,5 % по суммарному СКЗ можно лишь при $f_d = 192$ кГц. При этом отдельные спектральные составляющие с номиналом частот более четверти от $f_d = 192$ кГц можно восстановить с погрешностью лишь с погрешностью от 1,5 % до 5,5 % (контрольные частоты 11625 Гц и 23625 Гц). Предельно минимальные значения погрешности на уровне менее 0,4 % на частоте 23625 Гц достигнуты при $f_d = 768$ кГц.

Форму полигармонического сигнала со значением квадрата корреляции Пирсона R^2 более 0,98 можно восстановить при $f_d = 192$ кГц и более (рис. 12). Если использовать частоту дискретизации $f_d = 48$ кГц, то квадрат коэффициента корреляции R^2 изменяется от 0,7 до 0,85, что является достаточно низким значением для описания формы процесса.

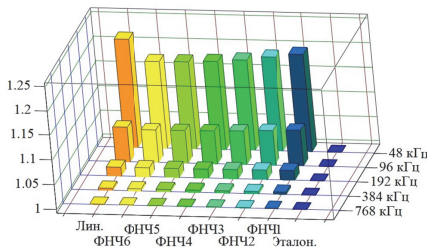


Рис. 11. Отношение СКЗ сигналов

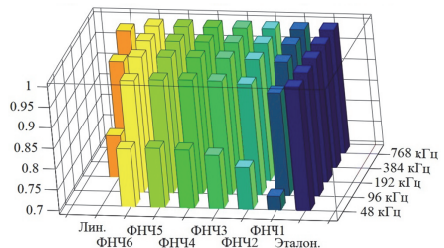


Рис. 12. Квадрат коэффициента корреляции

Полученные результаты имитационного моделирования с использованием системы Mathcad процесса восстановления аналогового сигнала из дискретной выборки с использованием ЦАП и фильтров нижних частот позволяют сделать некоторые выводы.

1. При восстановлении числовых и функциональных вероятностно-статистических характеристик стационарных и нестационарных случайных процессов, а также смеси моногармонических, полигармонических и случайных процессов частоту дискретизации необходимо выбирать не менее чем в 8 раз больше максимальной частоты в спектре сигнала при условии, что он ограничен. При этом можно надеяться на восстановление всех спектральных составляющих с погрешностью не более 5 %. При этом форма колебаний может быть восстановлена со значением квадрата корреляции Пирсона R^2 не менее 0,98.

2. Увеличение частоты дискретизации до 30-кратного превышения максимальной частоты в спектре сигнала позволит получить погрешность восстановления спектральных составляющих во всем диапазоне частот

не более 0,4 %, при этом можно ожидать, что R^2 будет не менее 0,99. Такое 30-кратное превышение f_d максимальной частоты решает проблему построения гистограммы распределения мгновенных значений сигнала и получения функции плотности вероятности сигнала, а также других вероятностных характеристик сигналов.

Полученные результаты подтверждают уже известные исследования, но эксперимент был нацелен на моделирование аппаратного восстановления сигнала, особенности которого вносят свои погрешности. Выбранные диапазоны частот и частоты дискретизации обусловлены имеющейся аппаратурой, позволяющей в дальнейшем провести натурные эксперименты.

Список литературы

1. Котельников, В.А. // Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности. М.: Изд-во Управления связи РККА, 1933. (Факсимил. переизд. // Радиотехника. 1995. № 4–5. С. 42); Сборник научных трудов. Т. 1. М.: Физматлит, 2008.
2. Инж. В.А. Котельников, «О пропускной способности “эфира” и проволоки в электросвязи (Приложение)», УФН, 176:7 (2006), 762–770; Phys. Usp., 49:7 (2006). С. 736–744. URL: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0176.200607h.0762>
3. Худяков, Г.И. Теорема отсчетов для цифровой обработки случайных сигналов / Г.И. Худяков // Компоненты и технологии. 2009. № 5 (94). С. 110–113.
4. Радиосистемы передачи информации: учебное пособие для вузов / В.А. Васин, В.В. Калмыков, Ю.Н. Себекин, А.И. Сенин, И.Б. Федоров; под ред. И.Б. Федорова и В.В. Калмыкова. М.: Горячая линия. Телеком, 2005. 472 с. ISBN 5-93517-232-1.
5. Вешкурцев, Ю.М. Определение частоты дискретизации случайного процесса / Ю.М. Вешкурцев, Д.А. Титов // Журнал радиоэлектроники. 2022. № 6. 14 с. DOI: 10.30898/1684-1719.2022.6.2.
6. ГОСТ Р МЭК 60942-2009. Калибраторы акустические. Технические требования и требования к испытаниям. М.: Стандартинформ, 2010. 55 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200078708> (дата обращения: 24.01.2026).
7. ГОСТ Р 50397-2011. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения (МЭК 60050-161:1990.). М.: Стандартинформ, 2013. 63 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200094154> (дата обращения: 24.01.2026).
8. Барат, В.А. Развитие метода акустической эмиссии за счет автоматизации обработки данных, повышения помехоустойчивости и достоверности обнаружения трещиноподобных дефектов металлоконструкций: дис. ... д-ра техн. наук / Барат Вера Александровна. М.: МЭИ, 2020. 306 с.
9. Растегаев, И.А. Методы и средства обнаружения шумоподобных сигналов источников акустической эмиссии трибологической и гидродинамической природы на основе иерархического беспорогового спектрально-временного анализа: дис. ... д-ра техн. наук / Растегаев Игорь Анатольевич. Тольятти: Тольяттинск. гос. ун-т, 2022. 328 с.

10. Naumenko, A.P. The piston compressor: The methodology of the real-time condition monitoring / A.P. Naumenko, V.N. Kostyukov // *Journal of Physics: Conference Series*. 2012. Vol. 364. No. 1. P. 012130. DOI: 10.1088/1742-6596/364/1/012130.

11. Naumenko, A.P. Real-time condition monitoring of reciprocating machines // A.P. Naumenko // *6th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies 2009*. Dublin, 23–25 June 2009. Vol. 2. Pp. 1201–1212.

12. Бехер, С.А. Методы контроля динамически нагруженных элементов подвижного состава при ремонте и в эксплуатации на основе комплексного использования тензометрии и акустической эмиссии: дис. ... д-ра техн. наук / Бехер Сергей Алексеевич. Томск, 2017. 321 с.

УДК 620.179.17

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ СЕНСИБИЛИЗАЦИИ
В АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЯХ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**Барат В.А.^{1,2}, Ушанов С.В.¹, Лукашев И.А.^{1,2}, Панькина А.А.², Лаврик Н.В.²¹ООО «Интерюнис-ИТ», Москва, Россия. E-mail: ushanovsv@interunis-it.ru²ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», Москва, Россия. E-mail: pankina_anastasiia@mail.ru

Представлены результаты исследования возможности обнаружения сенсibilизированного состояния аустенитных сталей методом акустической эмиссии (АЭ). Сенсibilизация рассматривается как ключевая предпосылка для последующего развития межкристаллитной коррозии (МКК). Установлено, что сенсibilизирующая термообработка стали 12Х18Н9 приводит к формированию карбидной сетки по границам зерен. Проведенный анализ данных АЭ, полученных в ходе статических испытаний образцов на трехточечный изгиб, позволил надежно отличить сенсibilизированное и исходное состояние на основании специфичных АЭ-параметров.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, аустенитная сталь, сенсibilизированное состояния аустенитной стали, межкристаллитная коррозия

Развитие межкристаллитной коррозии (МКК) аустенитных нержавеющих сталей, как правило, начинается с процесса сенсibilизации, в результате которого хром из твердого раствора связывается в карбиды, что приводит к образованию зон, обедненных хромом, у границ зерен. В аустенитных сталях сенсibilизация происходит при температурах 450–800 °С, из-за различной скорости диффузии углерода и хрома в указанном температурном диапазоне [1]. Причиной сенсibilизации чаще всего является неправильно проведенная термическая обработка либо проведение технологических операций в определенном температурном диапазоне. В процессе сенсibilизации в структуре материала возникают неоднородности, которые в электролите создают гальванические пары, запуская процесс коррозии. Для ранней диагностики перспективен метод акустической эмиссии (АЭ), поскольку образование карбидов и релаксация внутренних напряжений сопровождаются генерацией упругих волн [2].

Объектом исследования в данной работе является сталь аустенитного класса 12Х18Н9, широко применяемая в разных областях промышленности и имеющая склонность к МКК, обусловленную достаточно высоким содержанием углерода и отсутствием стабилизирующих элементов.

Для проведения механических испытаний были изготовлены образцы прямоугольной формы размером 120×20×3 мм. Часть образцов исследуемой стали была подвергнута сенсibilизирующей термической обработке при температуре 600 °С в течение 25 часов.

Исследование микроструктуры образцов до (рис. 1, *a*) и после вышеупомянутой термообработки (рис. 1, *б*) подтвердило склонность данной стали к МКК, на рис. 1, *б* границы зерен проявляются более выражено за счет формирования карбидной сетки. Помимо карбидной сетки в структуре просматриваются строчечные включения σ -фазы FeCr, не характерные для микроструктуры стали в исходном состоянии. Наличие σ -фазы было подтверждено металлографическими исследованиями образцов с использованием методов сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии.

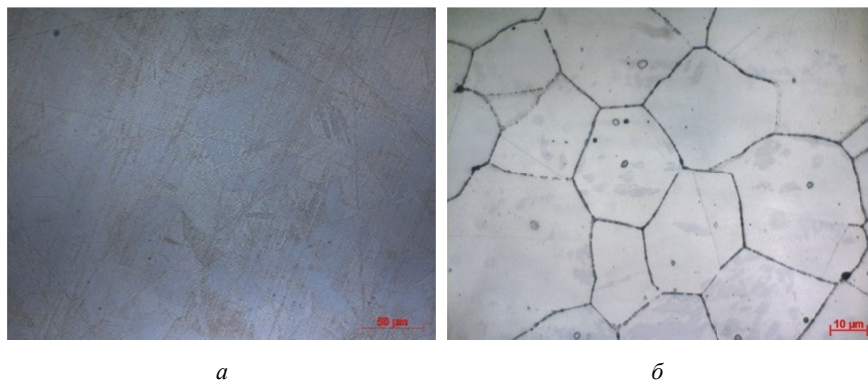


Рис. 1. Микроструктура недеформированной зоны образцов до (*a*) и после термической обработки при 600 °С в течение 25 часов без коррозионной обработки (*б*)

Образцы стали в исходном состоянии и после сенсibiliзирующей термической обработки были испытаны на статический трехточечный изгиб. При статическом изгибе образцов аустенитных сталей возникает интенсивная пластическая деформация, обусловленная скольжением дислокаций, двойникованием и фазовыми изменениями структуры металла. Эти процессы, характеризующиеся высокими значениями энергии релаксации, служат источниками АЭ и обеспечивают высокий уровень амплитуд импульсов АЭ.

Результаты испытаний образцов стали 12Х18Н9 (рис. 2) показали схожий средний уровень активности АЭ ~ 2 имп./с как для образца в исходном состоянии (рис. 2, *a*), так и для сенсibiliзированного (рис. 2, *б*). Значения амплитуд импульсов АЭ для бездефектного образца не превышают 60 дБ, для сенсibiliзированного образца наблюдается рост уровня амплитуд до 65–70 дБ.

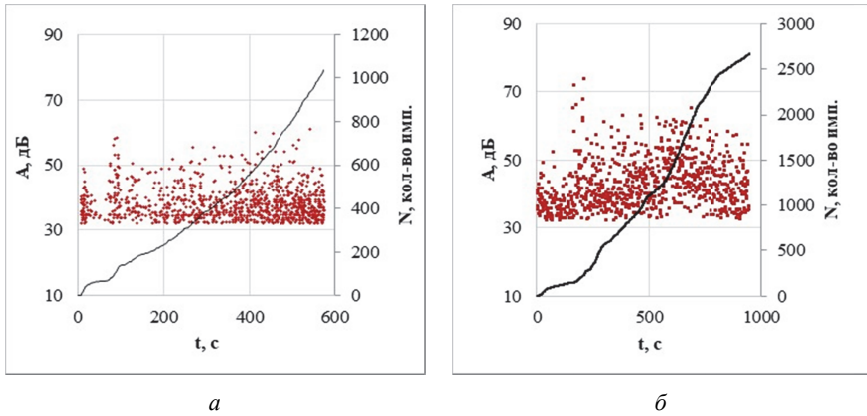


Рис. 2. Данные АЭ, амплитуды импульсов АЭ и суммарный счет при испытании образцов стали 12Х18Н9 в исходном состоянии (*а*) и в сенсibilизированном состоянии после термической обработки при 600 °С в течение 25 часов (*б*)

Наличие сенсibilизированного состояния приводит к изменению спектральных параметров сигнала АЭ. На рис. 3 показаны диаграммы рассеивания амплитуда – средняя частота (А–АФ) для данных, полученных при испытании образцов в исходном (рис. 3, *а*) и сенсibilизированном состоянии (рис. 3, *б*).

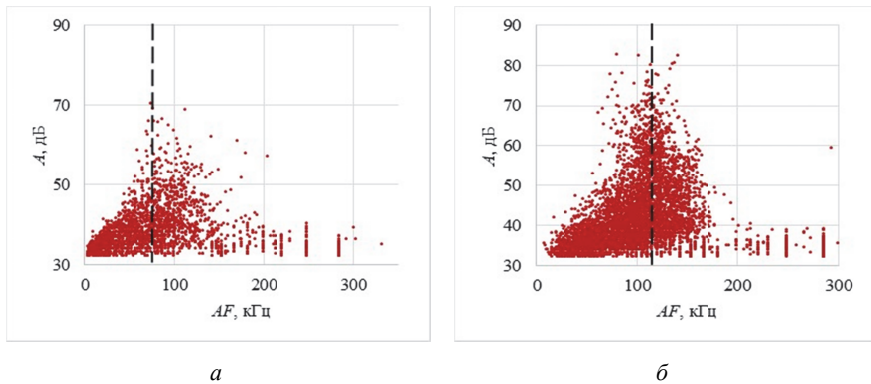


Рис. 3. Диаграммы рассеивания амплитуда – средняя частота (А–АФ) для данных, полученных при испытании образцов в исходном состоянии (*а*) и для данных, соответствующих сенсibilизированным образцам (*б*)

Как видно из данных диаграмм, в случае испытания образца в исходном состоянии наиболее интенсивные источники АЭ характеризуются средней частотой $AF \sim 75$ кГц, а для сенсibilизированного образца $AF \sim 110$ кГц.

Следует отметить, что амплитудные и частотные параметры сигналов АЭ являются известными критериальными параметрами при выявлении различных стадий МКК, эффективность их использования подтверждается результатом работы [3]. Таким образом, анализ сигнала АЭ при испытании позволяет выявить специфику измененной структуры и идентифицировать сенсibilизированное состояние.

Вывод

В ходе работы было установлено, что образцы аустенитной стали 12Х18Н9 в сенсibilизированном состоянии демонстрируют характерные изменения АЭ-характеристик: повышение уровня амплитуд импульсов и смещение средней частоты AF в высокочастотную область. Изменение параметров АЭ согласуется с изменением параметров микроструктуры образца, так как увеличение амплитуд импульсов АЭ может быть обусловлено формированием хрупкой σ -фазы в теле зерна и появлением карбидной сетки по границам зерен. Анализ данных АЭ позволяет выявлять склонность стали к МКК еще до контакта с агрессивной средой, что существенно расширяет возможности превентивного контроля.

* Исследование выполнено в рамках проекта «Разработка методики выявления процессов сенсibilизации и образования межкристаллитной коррозии в аустенитных сталях методом акустической эмиссии» (ПНИ-24/26-34) при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.

Список литературы

1. Межкристаллитная коррозия сталей: учебно-методическое пособие / Е.А. Меркушкин, В.В. Березовская, С.В. Сомина; Мин-во науки и высш. образования РФ. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. 72 с.
2. Merson, E. Application of acoustic emission method for investigation of hydrogen embrittlement mechanism in the low-carbon steel / E. Merson, A. Vinogradov, D. Merson // Journal of Alloys and Compounds. 2015. Vol. 645. N S1. Pp. S460–S463.
3. Xu, Jian. Acoustic emission response of sensitized 304 stainless steel during intergranular corrosion and stress corrosion cracking / Jian Xu, Xinqiang Wu, En-Hou Han // Corrosion Science. 2013. Vol. 73. Pp. 262–273.

УДК 620.179.17

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ФИЛЬТРАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Попов А.В., Волошина В.Ю., Лебединский М.С.
 ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж, Россия. E-mail: avrvunc@mail.ru

Разработанная модель обработки АЭ-сигналов основана на адаптивных моделях фильтрации АЭ-сигналов, отличается от известных использованием статистик высоких порядков, позволяет повысить точность полученных значений информативных параметров сигналов при проведении АЭ-диагностирования объектов.

Ключевые слова: акустические процессы, фильтрация, моменты высоких порядков

В случае высоко зашумленного сигнала акустической эмиссии (АЭ) с низким соотношением сигнал/шум применение фильтрации сигнала затруднено ввиду схожести скорости нарастания импульсов АЭ и импульсов шума. В таких случаях на начальном этапе обработки необходима дополнительная фильтрация сигнала АЭ.

Рассмотрим возможность определения точного времени прихода сигнала АЭ-методом статистик высоких порядков [1].

Установлено, что характеристикой акустического сигнала, позволяющей с наибольшей точностью, определить время возникновения импульса АЭ является центральный момент амплитуды сигнала шестого порядка:

$$S_6 = \frac{\sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^6}{(N-1)\sigma^6},$$

где \bar{u} – среднее значение амплитуды колебаний импульсов АЭ в заданном временном окне;

N – количество точек в заданном временном окне;

σ – среднеквадратическое отклонение амплитуды импульсов АЭ;

i – номер отсчета начала выборки.

Момент возникновения импульсов АЭ характеризуется резким изменением центральных моментов значений амплитуд исследуемого акустического сигнала.

Даже при незначительном отклонении значений амплитуды сигнала от установившегося значения (уровня шума) значительно возрастает значение центрального момента амплитуды сигнала шестого порядка (рис. 1–3).

Применим данный подход для постобработки отрезка реализации сигнала АЭ, полученного в результате проведения статических испытаний

до разрушения композитных образцов (см. рис. 1). При этом ошибка определения точного времени возникновения импульса АЭ составила $1 \cdot 10^{-5} \pm 1 \cdot 10^{-6}$ секунды.

Методом «скользящего среднего» обрабатываем полученную на выходе реализацию зависимости центрального момента шестого порядка амплитуды сигнала АЭ от времени с применением скользящего временного окна размером $3 \cdot 10^{-4}$ (см. рис. 2).

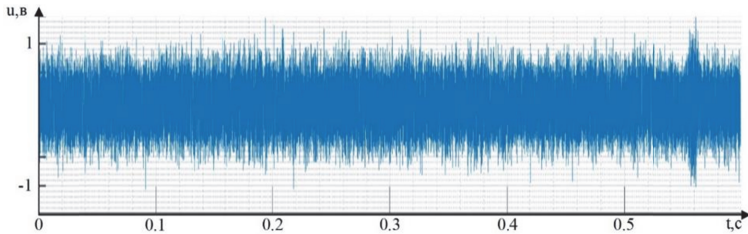


Рис. 1. График реализации отрезка АЭ-процесса

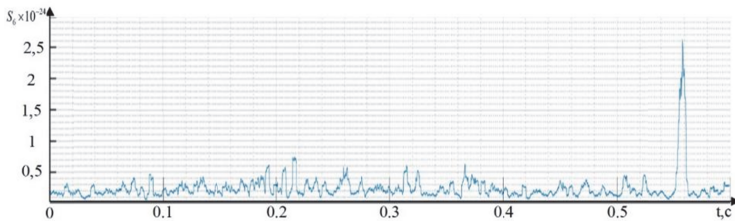


Рис. 2. График зависимости центрального момента шестого порядка амплитуды импульсов АЭ от времени

Рассчитаем значение S_6 методом скользящего среднего на заданных интервалах выборки (см. рис. 3). Метод основывается на сглаживании реализации на коротком интервале с помощью прямой не параллельной оси абсцисс. Если выбрать интервал сглаживания от $t - \frac{1}{2}T_{\text{сгл}}$ до $t + \frac{1}{2}T_{\text{сгл}}$ с центром в точке t , аппроксимация математического ожидания прямой на этом интервале приводит к формуле, которая позволяет найти оценку математического ожидания нестационарного случайного процесса $x(t)$:

$$m_x^*(t) = \frac{1}{T_{\text{сгл}}} \int_{t - \frac{1}{2}T_{\text{сгл}}}^{t + \frac{1}{2}T_{\text{сгл}}} x(S) dS,$$

где $m_x^*(t)$ – математическое ожидание значений центрального момента шестого порядка на заданном интервале сглаживания.

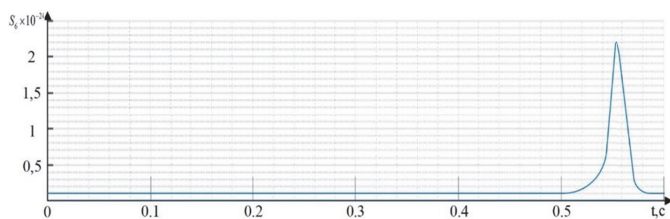


Рис. 3. График зависимости среднего значения центрального момента шестого порядка амплитуды импульсов АЭ от времени

После детектирования получим график зависимости количества импульсов АЭ (n) на заданном интервале времени (рис. 4).

Анализ полученных результатов подтвердил возможность применения метода статистик высоких порядков для определения точного времени возникновения импульса АЭ при диагностировании силовых элементов конструкций.

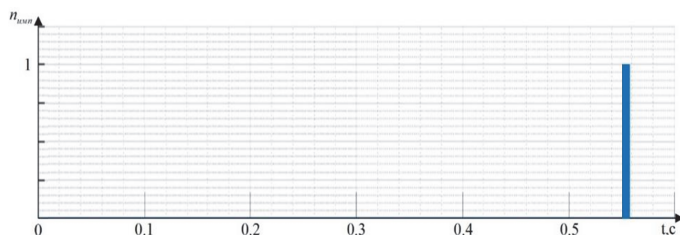


Рис. 4. Диаграмма зависимости количества импульсов АЭ на заданных интервалах

Использование моментов амплитуды сигнала АЭ шестого порядка позволяет производить обработку сильно зашумленного сигнала АЭ без применения аппаратных фильтров в конструкции АЭ-аппаратуры и получать достоверные значения информативных параметров потока импульсов для их дальнейшего анализа.

Вывод

Разработанная модель обработки АЭ-сигналов основана на адаптивной модели фильтрации АЭ-сигналов, отличается от известных использованием статистик высоких порядков, позволяет повысить на 15–20 % точность полученных значений информативных параметров сигналов при проведении АЭ-диагностики.

Список литературы

1. Теория вероятностей и ее инженерные приложения: учебное пособие / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. 5-е изд., стер. М.: ЮСТИЦИЯ, 2018. 480 с.

УДК 538.951

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ ПИКА МОЩНОСТИ АЭ ОТ ПАРАМЕТРОВ МИКРОСТРУКТУРЫ СПЛАВА ZX10 ПРИ СЖАТИИ

Данюк А.В., Мерсон Д.Л., Брилевский А.И.
Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия.
E-mail: alexey.danyuk@gmail.com

В работе рассмотрено явление акустической эмиссии (АЭ) при монотонном сжатии образцов магниевых сплавов в пяти структурных состояниях. При деформировании в области упругопластического перехода наблюдается пик мощности сигнала АЭ, связанный с работой систем скольжения и двойникования в кристаллах. Установлено, что величина пика мощности сигнала АЭ функционально связана с долей активных зерен.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, магний, текстура, дислокационное скольжение, двойникование

Магниевые сплавы обладают лучшей характеристикой прочности, отнесенной к единице массы, их применение в транспортных системах положительно сказывается на энергоэффективности. Разработанные в 1940–1970 годах системы деформируемых магниевых сплавов были адаптированы к технологиям производства воздушного транспорта и являются достаточно сложными и дорогостоящими, как по используемым элементам легирования, так и по технологиям термомеханической обработки. В начале 2000-х магний и его сплавы нашли новое направление применения в медицине – в качестве материала для изготовления биорезорбируемых имплантатов для хирургии.

Сильная анизотропия свойств магния связана с кристаллическим строением – гексагональной плотноупакованной (ГПУ) кристаллической решеткой. ГПУ структура магния обладает некоторыми особенностями работы кристаллических деформационных систем (дислокационное скольжение и двойникование), например, очень низкие значения критического сдвигового напряжения систем легкого скольжения/двойникования и одновременно крайне ограниченное количество таких систем приводит к сильно ограниченной пластичности при деформации в монокристаллическом состоянии. В поликристаллическом материале неудовлетворительное деформационное поведение проявляется в сильно текстурированном состоянии. Поэтому при деформационной обработке необходимо учитывать возможности структурно-текстурного состояния заготовки и контролировать запас пластичности при механическом или термомеханическом воздействии.

В области физического металловедения метод акустической эмиссии нашел широкое применение для изучения фазовых переходов, структурной перестройки и деформационных процессов. Хорошо изучены или доказаны такие аспекты метода как: влияние твердорастворного упрочнения сплавов на параметры акустической эмиссии при пластической деформации; линейная зависимость мощности акустической эмиссии от площади свободной поверхности деформируемого материала [1]; пропорциональная зависимость мощности акустической эмиссии от величины среднего пробега дислокаций, лимитируемого размером зерна поликристаллических ГЦК металлов при растяжении [2–4]; зависимость энергии и спектрального состава акустической эмиссии от кристаллографического направления растяжения монокристаллических медных образцов [5].

Сигнал акустической эмиссии имеет насыщенный спектральный состав и содержит информацию об источнике (характеристика источника) и о среде распространения (передаточная характеристика) сигнала [6].

Важным и перспективным свойством метода АЭ является его применимость в производственных и промышленных условиях, при отработке технологии термомеханической обработки заготовок. Целью настоящего исследования является нахождение корреляций между структурно-текстурными параметрами медицинского магниевое сплава ZX10 и акустико-эмиссионным откликом его образцов на приложение сжимающей нагрузки и определение возможности на этой основе судить о качестве термомеханических обработок *in-situ*.

Для исследования выбран сплав ZX10 системы легирования MgZnCa, с содержанием цинка и кальция 1,0 и 0,12 вес. % соответственно и обладающий перспективным комплексом физических и биохимических свойств, что позволяет в настоящее время применять его в медицине для изготовления биорезорбируемых имплантатов. Методами термомеханической обработки был сформирован набор образцов материала следующих структурных состояний: I – литое, II – экструдированное, IV – всесторонняя изотермическая ковка (ВИК), III – ВИК с последующей экструзией, V – ВИК с последующей прокаткой.

Из полученных заготовок вырезались образцы при помощи электроэрозионного станка Sodick AG400LLN2W (Япония), таким образом, исключался наклеп приповерхностного слоя от режущего инструмента. Образцы для исследований и испытаний были в виде кубов со стороной 10 мм для типов: I, IV, V; 8 мм для типа II; куб со стороной 4 мм и цилиндр Ø6×6 мм для типа III.

Методами растровой электронной микроскопии Zeiss Sigma (Германия) и анализа дифракции обратно отраженных электронов (EBSD) были получены структурные карты по два образца типов I, II, III, IV и три образца для типа V для исследования в двух и трех соответственно взаимно

перпендикулярных направлениях. Направления выбирались согласно направлениям деформационной обработки: I – поперек (ED) и вдоль (TD) слитка; II, III – поперек (ED) и вдоль (TD) направления экструзии; IV – поперек (ED) и вдоль (TD) поковки; V – поверхность проката (ND), поперечное направление (TD), направление проката (RD).

Для проведения механических испытаний были отобраны образцы идентичного набора, как при исследовании структуры. Нагружение проводилось на плоскость с соответствующей маркировкой, например: маркировка образца «V ND» – сжатие по толщине проката материала с обработкой по типу V – прокатка после ВИК.

Все механические испытания проведены последовательно одним циклом, на универсальной испытательной машине Tinius Olsen H50kT, с предельной нагрузкой до 50 кН и прецизионным измерителем деформации трансформаторного типа (LVDT) диапазоном регистрации абсолютной деформации до 2,5 мм и разрешением 1 мкм. Все испытания выполнены с набором скоростей перемещения опорных площадок, эквивалентных скорости деформирования $2 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Испытания образцов на сжатие прекращали при деформации 8–10 %, так как дальнейшее нагружение не имело смысла в силу непрерывного увеличения площади поперечного сечения и резкого роста нагрузки.

Регистрация акустической эмиссии выполнена на аппаратуре «PCI-2» (Mistras DataSolutions, США), непрерывной записью в цифровом формате с частотой дискретизации 2 МГц, разрядность данных 16 бит, в широкополосном режиме 20 кГц – 1 МГц. Аналоговый тракт регистрации акустической эмиссии состоял из приемного преобразователя «Micro80» с частотным диапазоном 200–900 кГц, который был подключен через малощумящий предварительный усилитель усилением +66 дБ, порог амплитудного детектора составил 27 дБ при уровне шума 25 дБ.

Зарегистрированный при нагружении и деформировании образцов сигнал подвергался процедуре пост обработки, методами цифровой обработки в программной среде «Octave». За информативный параметр сигнала акустической эмиссии был выбран параметр мощность сигнала $P(t)$, рассчитанный в скользящем окне длительностью 1 секунда. Выбор относительно большой ширины скользящего окна обусловлен деформационным поведением магниевых сплавов, заключающимся в активации двойникования при низком механическом напряжении. Двойникование создает поток акустической эмиссии импульсного характера, а в данной работе требуется оценка свойств интегрального поведения потока сигналов акустической эмиссии, создаваемых при деформировании материала.

Ключевым моментом данной работы является учет вклада текстуры в формирование пика мощности сигнала АЭ через оценку доли активного материала при напряжении, соответствующем максимальной интенсивности

АЭ в процессе деформации. Для этого оценим объемную долю зерен, для которых фактор Шмидта систем скольжения (двойникования) выше порогового значения. Фактические пороговые значения скольжения зависят от содержания легирующих элементов и примесей, температуры испытания и пр. [7–9]. В литературе нет полного набора данных о пороговых значениях фактора Шмидта непосредственно для сплава ZX10, поэтому в данной работе с определенной долей допущения были приняты данные после анализа работ [7–11], рассчитанные индивидуально для четырех систем скольжения с минимальным пороговым сдвиговым напряжением (табл. 1).

Таблица 1
Деформационные системы и критические значения сдвигового напряжения

σ_{CRSS} , МПа	Скольжение базисных плоскостей {0001} <10-10>	Двойникование растяжения {10-1-2} <10-11>	Скольжение призматической плоскости в направлении <a> {1-100} <11-20>	Скольжение пирамидальной плоскости в направлении <a+c> {10-11} <11-2-3>
Принято в данной работе	0,5	21	40	81
ZK60 или Mg [12]	0,45–0,81	2	39,2	48–87
ZX10 [10]	13,5	37	–	85
Mg [11]	0,45–0,81	2	39,2	–
ZK60 [8]	14–18	45–68	133–175	–
AZ31B [11]	10	15–35	55	–

Исследование эмпирической связи зависимости пика мощности акустической эмиссии от текстурно-обусловленной доли активных к деформации зерен выполняли по следующей процедуре:

1. Выполнение механического испытания с регистрацией акустической эмиссии.

2. Определение механического напряжения (σ_{AEmax}), при котором сигнал мощности акустической эмиссии принимает максимальное значение (P_{exp}).

3. Оценка критического (порогового) Шмидт-фактора (SF_{crit}). Для каждой системы скольжения и двойникования, из приведенных в табл. 1, рассчитывается из условия активности деформационной системы при действующем напряжении: $\sigma_{AEmax} > 2\sigma_{CRSS}$, т. е. $SF_{crit} = \sigma_{CRSS} / \sigma_{AEmax}$.

4. Для каждого направления нагружения (деформирования) исследуется карта микроструктуры, полученная методами растровой электронной

микроскопии и анализом EBSD. Для пяти типов термомеханической обработки были выбраны по 2 (3 для проката V) ортогональных направления испытания и изучения структуры, всего 11 образцов.

5. Расчет объемной доли активного материала (ρ) – т. е. относительная площадь карты микроструктуры, где кристаллическая решетка благоприятно ориентирована к приложенному напряжению и для анализируемых деформационных систем Шмидт-фактор выше расчетного критического (порогового) значения.

6. Проведение нормировки величины пика сигнала мощности АЭ на размер зерна, размер образца (площадь свободной поверхности) по соотношению: $P_{\text{норм}} = P_{\text{exp}} / (D \cdot S)$, $P_{\text{норм}}$ – нормированное значение пика мощности сигнала АЭ, Вт; P_{exp} – экспериментально зарегистрированная величина пика мощности сигнала АЭ, Вт; D – размер зерна, мкм; S – площадь свободной боковой поверхности образца, м².

7. Построение диаграммы в координатах Нормированная величина пика мощности сигнала акустической эмиссии ($P_{\text{норм}}$) – Объемная доля активного материала (ρ); определение вида полученной зависимости и коэффициента достоверности аппроксимации.

При испытании всех образцов велась непрерывная цифровая запись сигнала АЭ и приложенного механического напряжения, что показано на рис. 1 синим и черным цветом соответственно. После проведения всей серии испытаний проводилась пост обработка, заключающаяся в вычислении параметра мощности сигнала акустической эмиссии, который показан красной линией на рис. 1.

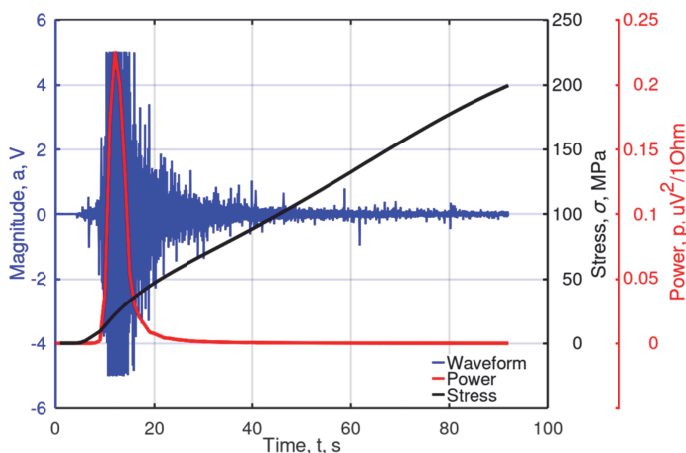


Рис. 1. Вид сигнала акустической эмиссии (синий), мощности сигнала (красный), механического напряжения (черный) при сжатии образца I-TD

Пик мощности сигнала акустической связан с активацией деформационных систем дислокационного скольжения и двойникования и идентифицирует момент наиболее массового перехода материала из стадии упругого сопротивления к стадии пластического течения, т. о. значение механического напряжения при пике мощности АЭ является характеристикой материала, подобной условному пределу текучести, и соответствует точке перехода материала к стадии деформационного упрочнения. Соответственно, именно для этого значения напряжения будем рассчитывать пороговое значение фактора Шмидта систем скольжения и долю включившегося в деформационный процесс материала. Зависимости мощности сигнала АЭ от механического напряжения при сжатии образцов магниевого сплава ZX10 показаны на рис. 2. Далее величину мощности сигнала акустической эмиссии будем приводить в дБ относительно 1 мкВт.

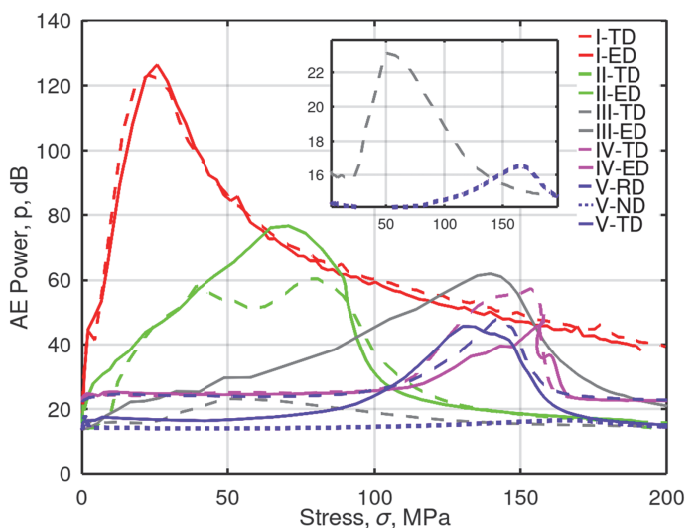


Рис. 2. Мощность сигнала АЭ от приложенного механического напряжения

По структурным картам с применением программного обеспечения обработки структур были определены статистические распределения и средний размер зерна (табл. 2) и доля активной структуры для чего оценили критические значение фактора Шмидта при установившемся механическом напряжении σ_{AEmax} , для каждой из деформационных систем. В табл. 2 приведены ключевые для данной работы деформационные системы (двойникование и призматическое скольжение), значение, близкое

к нулю, означает безусловную активацию данной системы скольжения, в отсутствие деформационного упрочнения, а «-» – не реализуемость деформационной системы из-за малого значения главного напряжения. Системы базисного скольжения практически реализуются во всех исследованных структурах уже при минимальном внешнем напряжении, а для систем скольжения пирамидальных плоскостей, наоборот, приложенное напряжение не достигает порогового сдвигового напряжения. Пример результата построения карты областей структуры, где значение фактора Шмидта более порогового приведен на рис. 3 справа, а оценка относительной площади, характеризующая долю активной структуры (ρ), приведена в табл. 2.

Таблица 2

Параметры эксперимента, АЭ и микроструктуры сплава ZX10

Образец	P_{exp}	S	D	P_{norm}	σ_{AEmax}	SF_{crit}		ρ
	дБ	мм ²	мкм	дБ/м ² мкм	МПа	{10-1-2} <10-11>	{1-100} <11-20>	
I – TD	123	400	700	136	23	–	–	~1
I – ED	126	400	900	136	26	–	–	~1
II – TD	60	256	25	111	65	0,32	–	0,62
II – ED	77	256	23	128	70	0,3	–	0,79
III – TD	23	64	27	87	53	0,4	–	0,4
III – ED	62	113	13	127	138	0,15	0,29	0,96
IV – TD	58	400	3	125	154	0,14	0,26	0,73
IV – ED	47	400	3	114	158	0,13	0,25	0,66
V – TD	46	400	9	102	130	0,16	0,31	0,67
V – ND	16,2	400	9	72	163	0,13	0,25	0,19
V – RD	49	400	8	106	143	0,15	0,28	0,59

По данным табл. 2 построили зависимость $P_{norm}(\rho)$ (рис. 4), которая достаточно хорошо описывается уравнением: $P_{norm} = 78\rho + 59$. Регрессионный критерий подобия полученного уравнения и эмпирических значений $R^2 = 0,93$, что демонстрирует хорошую сходимость данных. Отклонение экспериментальных данных от идеального совпадения может быть связано как с экспериментальными и приборными погрешностями оценки параметров, так и с наличием некоторого количества сложно учитываемых факторов металла: флуктуацией микроструктуры и текстуры в заготовках; прочими дефектами сплава и кристаллов, искажающими работу кристаллических механизмов пластичности и т. д.

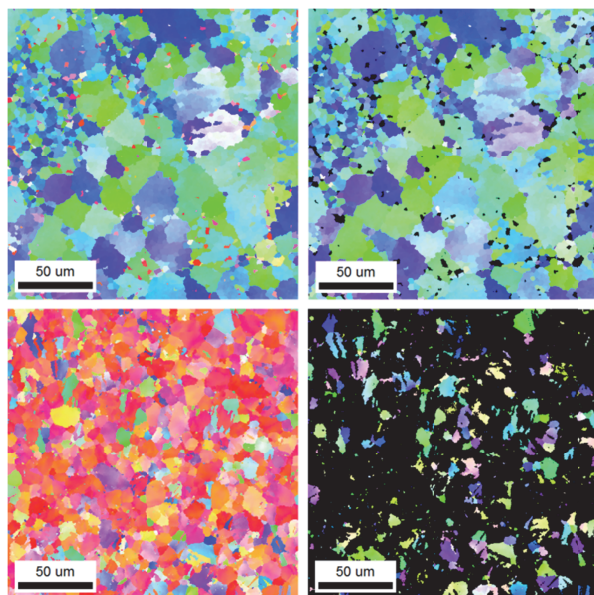
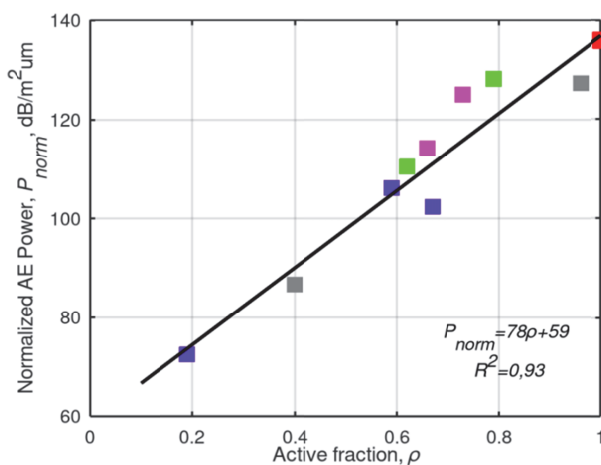


Рис. 3. Пример исследования макроструктуры и текстуры:
 слева – микроструктура; справа – доля активной к деформации
 микроструктуры – выделена цветом, не активная доля – черная.
 Образец III – ED (верх); Образец V – ND (низ)



**Рис. 4. Диаграмма эмпирической зависимости нормализованной мощности
 сигнала АЭ от доли текстурно-активного материала**

Выводы

На основе испытания образцов сплава ZX10 на сжатие в пяти различных состояниях (литое, экструдированное из литого, после ВИК, экструдированное после ВИК, горячекатаное после ВИК) и в различных ортогональных направлениях с записью акустической эмиссии и микроструктурных исследований получены следующие результаты.

Установлена экспоненциальная зависимость высоты пика мощности сигнала акустической эмиссии от доли материала, вовлеченного в кристаллографически обусловленные деформационные процессы дислокационного скольжения и двойникования. Важным наблюдением является то, что величина пика мощности акустической эмиссии зависит намного сильнее от текстуры, чем от размера зерна.

Величина и положение пика мощности сигнала акустической эмиссии на диаграмме $P_{norm}(\sigma_{AEmax})$ является комплексной характеристикой, отражающей способность структуры к пластическому деформированию (запас пластичности) при данном уровне напряжений (напряжение текучести).

Результаты исследования могут быть использованы для корректировки технологии деформационной обработки (повышения качества) магниевых сплавов на основе предварительно установленных связей между структурными и текстурными характеристиками сплава и данными акустико-эмиссионного *in-situ* мониторинга деформационной обработки (ковка волочение, экструзия). Например, с целью контроля потенциала пластичности материала и предотвращения избыточного упрочнения и в целом для снижения вероятности формирования внутренних дефектов полуфабриката.

Благодарности и финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-19-00636.

Список литературы

1. On the role of free surface in acoustic emission / D. Merson, M. Nadtochiy, V. Patlan, A. Vinogradov, K. Kitagawa // *Materials Science and Engineering A*. 1997. No. 234. Pp. 587–590. URL: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00248-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00248-7)
2. Vinogradov, A. Phenomenological approach towards modelling the acoustic emission due to plastic deformation in metals / A. Vinogradov, I. Yasnikov, D. Merson // *Scripta Materialia*. 2019. No. 170. Pp. 172–176. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.06.011>
3. Effect of grain size on the mechanisms of plastic deformation in wrought Mg–Zn–Zr alloy revealed by acoustic emission measurements / A. Vinogradov, D. Orlov, A. Danyuk, Y. Estrin // *Acta Materialia*. 2013. No. 61. Pp. 2044–2056. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.12.024>

4. Vinogradov, A. Acoustic emission in ultra-fine grained copper / A. Vinogradov // *Scripta Materialia*. 1998. No. 39. Pp. 797–805. URL: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(98\)00180-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(98)00180-8)
5. Acoustic emission spectrum and its orientation dependence in copper single crystals / A. Vinogradov, M. Nadtochiy, S. Hashimoto, S. Miura // *Materials Transactions JIM*. 1995. No. 36. Pp. 496–503. URL: <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.36.496>
6. Predicting plastic deformation of crystalline materials by deciphering acoustic emission / D. Berta, B. Katzer, K. Schulz, P.D. Ispánovity // *Npj Acoustics*. 2025. No. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s44384-025-00019-4>
7. Anisotropy of wrought magnesium alloys: A focused overview / B. Shi, C. Yang, Y. Peng, F. Zhang, F. Pan // *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022. Vol. 10. Pp. 1476–1510. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.03.006>
8. Effects of precipitate type on twin/slip activity in ZK60 alloys and yield asymmetry / W. Ren, R. Xin, J. Xu, B. Song, L. Zhang, Q. Liu // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. No. 792. Pp. 610–616. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.085>
9. Effect of LI content on the microstructure and mechanical properties of as-Homogenized MG-LI-AL-ZN-ZR alloys / Y. Sun, F. Zhang, J. Ren, G. Song // *Alloys*. 2023. No. 2. Pp. 89–99. URL: <https://doi.org/10.3390/alloys2020006>
10. Deformation mechanisms of Mg-Ca-Zn alloys studied by means of micropillar compression tests / J. Wang, Y. Chen, Z. Chen, J. Llorca, X. Zeng // *Acta Materialia*. 2021. No. 217. P. 117151. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117151>
11. Hardening evolution of AZ31B Mg sheet / X. Lou, M. Li, R. Boger, S. Agnew, R. Wagoner // *International Journal of Plasticity*. 2006. No. 23. Pp. 44–86. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2006.03.005>

УДК 534.08

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ГИБКИХ ПОЛИМЕРНЫХ АРМИРОВАННЫХ ТРУБ НЕСВЯЗНОЙ КОНСТРУКЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ

Мисейко А.Н.¹, Харемов К.В.¹, Мишунин В.С.¹, Живоносная Д.М.¹,
Перов К.А.², Богатов М.В.^{2,3}, Ковалев С.А.⁴

¹Общество с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр «Эгида»,
Самара, Россия. E-mail: aegis-rus@aegis-rus.com

²ООО «НИЦ «Неметалл», Самара, Россия. E-mail: perov@nicnemetall.ru

³Самарский государственный технический университет, Самара, Россия.
E-mail: bogatov@npcsamara.ru

⁴ООО «СИБУР ПолиЛаб», Москва, Россия. E-mail: kovalevsera@sibur.ru

В статье приведено исследование возможностей метода акустической эмиссии для решения задачи диагностирования гибких полимерных армированных труб (ГПАТ) несвязной конструкции. Проведены гидравлические испытания двадцати образцов до и после нанесения дефектов. Проанализированы паттерны появления активности АЭ-импульсов и сделаны выводы о типах дефектов, имеющих наиболее сильное влияние на устойчивость конструкции к повышенному давлению. Выявлены наиболее информативные параметры для определения предпосылок к разрушению, а также разработаны рекомендации для дальнейшего развития темы.

Ключевые слова: гибкие полимерные армированные трубы, ГПАТ, гидравлические испытания, неразрушающий контроль, метод акустической эмиссии, электрохимическая коррозия

Введение

В связи с активным развитием технологий поиск новых материалов и конструкций является актуальной задачей, позволяющей снизить затраты без потери эксплуатационных характеристик объектов. Одним из таких новых решений являются гибкие полимерные армированные трубы (ГПАТ), представляющие собой многослойную конструкцию (три и более слоя), состоящую из внутреннего слоя, армирующего слоя и внешней оболочки. При этом тип конструкционного материала, из которого состоит армирующий слой, очень вариативен и может представлять собой стекловолокно, стеклоленту, алюминиевую фольгу, синтетические нити (арамид, полиэфир), стальную проволоку, натуральные нити (лен), стальные ленты или стальные пруты. [1, 2].

Однако несмотря на относительно низкую стоимость и легкость монтажа, ГПАТ имеют склонность к стремительному и сложно прогнозируемому разрушению при повышенном давлении при условии наличия одного или нескольких нижеприведенных механизмов разрушения [3, 4]:

1. **Пермеация (просачивание).** При высоких давлениях и температурах кислые газы (CO_2 , H_2S) и легкие углеводороды могут диффундировать сквозь полимерный лайнер в межслойное пространство. Это приводит к накоплению давления между слоями и риску образования «вздутый» при резком сбросе внешнего или внутреннего давления.

2. **Коррозия армирующего слоя.** Если армирование выполнено из металлического материала, то при повреждении внешней/внутренней оболочек или пермеации агрессивных газов начинается стремительная коррозия металла. Это критически снижает несущую способность трубы, что может привести к внезапному разрыву под рабочим давлением.

3. **Механические повреждения и усталость.** Повреждения внешней оболочки при монтаже ускоряют доступ внешних коррозионных сред к армирующему слою. Циклические нагрузки в сочетании с H_2S ускоряют рост микротрещин, вызванных коррозионной усталостью.

При этом в связи с особенностями конструкции разрушение, как правило, происходит при деградации внутреннего слоя в местах нахлеста армирующего слоя, а не в зонах наличия несплошностей, как это зачастую бывает при использовании металлических труб. Это усложняет проведение контроля, так как дефект может возникнуть в любой части трубы с равной вероятностью. При этом само по себе образование разрыва на ГПАТ довольно сложно спрогнозировать, поэтому с точки зрения промышленной безопасности наиболее эффективным методом предотвращения крупномасштабных утечек является своевременная ревизия, правила которой описаны в [5], где указано, что во время ревизии необходимо проводить периодические гидравлические испытания в соответствии с регламентом эксплуатирующей организации с учетом требований [6]. Однако данные нормативные документы никак не регламентируют контроль и оценку технического состояния трубопровода во время гидравлических испытаний. Одним из проверенных надежных методов является метод акустико-эмиссионного (АЭ) контроля, использование которого описано в [7]. Сам по себе метод хорошо подходит для регистрации активно развивающихся дефектов и потенциально может быть использован не только как метод контроля состояния трубопровода во время гидравлических испытаний, но и как метод, реализуемый в составе стационарной системы мониторинга, позволяющий своевременно обнаружить развитие опасного дефекта в процессе эксплуатации.

Тем не менее при применении метода АЭ для контроля ГПАТ потенциально может возникнуть ряд технических проблем, связанных с высоким затуханием сигнала во внешней полимерной оболочке и сложностью интерпретации сигналов. В многослойных структурах акустические сигналы могут возникать не только в процессе непосредственного разрушения,

но и при протекании других процессов, таких как трение слоев друг о друга, растрескивание матрицы, отслоение волокон полимера, разрыв армирующих нитей и т. п.

В связи с этим в докладе рассматривается возможность применения данного метода контроля для технического диагностирования линейных трубопроводов из ГПАТ (с армированием металлической лентой) и фитингов.

1. Методология экспериментального исследования

Для выявления области применимости АЭ-метода при контроле ГПАТ был разработан план экспериментального исследования, заключающийся в последовательном выполнении следующих этапов:

1. Подготовка к АЭ-контролю образцов ГПАТ:

- определение уровня механических и электромагнитных шумов объектов контроля;
- определение коэффициента затухания сигналов АЭ в конструкции объектов;
- измерение скорости распространения сигналов АЭ в объектах контроля;
- определение величин установочных параметров акустико-эмиссионного измерительного комплекса A-Line DDM-2 и проверка точности локации.

2. Первичный АЭ-контроль при проведении гидроиспытаний образцов ГПАТ с установленными фитингами на стендах. АЭ-контроль образцов ГПАТ выполнялся в их вертикальном положении. Образцы вначале заполнялись водой с температурой не ниже 5 °С, а затем нагружались внутренним избыточным давлением с помощью электрического или ручного насосов. При первичном АЭ-контроле образцы ГПАТ нагружались от 0 МПа до 6,3 МПа, с выдержкой на максимальном давлении в течение 5 минут и последующим сбросом давления до 0 МПа.

3. Анализ данных первичного АЭ-контроля образцов ГПАТ с фитингами, позволяющий сделать предположение о возможности и условиях выявления производственных дефектов при реализованных режимах нагружения.

4. Повторный АЭ-контроль при проведении гидроиспытаний образцов ГПАТ на стендах с установленными фитингами после нанесения дополнительных наружных дефектов (повреждений, моделирующих воздействия при проведении строительно-монтажных работ (СМР) – надрезы, заломы, следы от удара) на каждый образец ГПАТ. АЭ-контроль образцов ГПАТ выполнялся в их вертикальном положении. Образцы вначале заполнялись водой с температурой не ниже 5 °С, а затем нагружались внутренним избыточным давлением с помощью электрического или ручного насосов.

При повторном АЭ-контроле образцы ГПАТ нагружались от 0 МПа до 6,3 МПа, с выдержкой на данном давлении в течение 10 минут, затем нагружение продолжалось до момента разрушения (разгерметизации) образца и последующего сброса давления до 0 МПа.

5. Анализ данных повторного АЭ-контроля образцов ГПАТ с нанесенными дефектами, имитирующими воздействия в ходе СМР, позволяющий сделать вывод о возможности и условиях выявления нанесенных дефектов при реализованных режимах нагружения.

В качестве объектов первичного АЭ-контроля при проведении гидроиспытаний выступали 20 образцов ГПАТ с установленными фитингами от изготовителя. Маркировка ГПАТ: гибкая армированная металлической лентой труба КТС-140/180-6.3 МПа по ТУ 22.21.21-127-32990936-2022. Наименование образцов, их размеры, количество образцов и виды производственных дефектов (при наличии) приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Наименование образцов, их размеры, количество образцов
и виды производственных дефектов (при наличии)**

№ п/п	Наименование объекта контроля	Маркировка Заказчика	Обозначение на трубе (отметки сделаны на заводе)	Размеры		Кол-во образцов	Примечание (вид дефекта)
				Длина, мм	Наружный диаметр, мм		
1	Гибкая армированная металлической лентой труба с фитингами под приварку	СБ-Д1	Без отметок	1892	161,9	1	Без дефектов
2		СБ-Д2	Без отметок	1895	162,1	1	Без дефектов
3		СБ-Д3	Без отметок	1896	161,9	1	Без дефектов
4		СБ-Д4	Без отметок	1908	162	1	Без дефектов
5		СБ-Д5	Без отметок	1903	161,8	1	Без дефектов
6		СБ-Д6	Без отметок	1920	161,9	1	Без дефектов
7		СБ-Д7	Без отметок	1905	161,8	1	Без дефектов
8		СБ-Д8	Без отметок	1909	162	1	Без дефектов
9		СБ-Д9	Без отметок	1910	162	1	Без дефектов
10		СБ-Д10	Без отметок	1917	161,8	1	Без дефектов
11		СБ-Д11	1	1912	162,3	1	Повреждения армирующего слоя
12		СБ-Д12	2	1921	161,9	1	Повреждения армирующего слоя

Окончание таблицы 1

№ п/п	Наименование объекта контроля	Маркировка Заказчика	Обозначение на трубе (отметки сделаны на заводе)	Размеры		Кол-во образцов	Примечание (вид дефекта)
13	Гибкая армированная металлической лентой труба с фитингами под приварку	СБ-Д13	3	1920	161,8	1	Повреждения армирующего слоя
14		СБ-Д14	4	1913	161,9	1	Повреждения армирующего слоя
15		СБ-Д15	5	1921	161,8	1	Повреждения армирующего слоя
16		СБ-Д16	6	1910	162	1	Повреждения армирующего слоя
17		СБ-Д17	7	1924	161,8	1	Повреждения армирующего слоя
18		СБ-Д18	8	1912	161,8	1	Повреждения армирующего слоя
19		СБ-Д19	9	1918	162	1	Повреждения армирующего слоя
20		СБ-Д20	10	1905	161,8	1	Повреждения армирующего слоя

Длина участка, покрытого полимером (без учета длины металлических заглушек), для контролируемых ГПАТ составляла от 1000 до 1080 мм.

В качестве объектов повторного АЭ-контроля при проведении гидроиспытаний выступали те же 20 образцов ГПАТ с установленными фитингами от изготовителя, но после нанесения дополнительных наружных повреждений, моделирующих воздействия при проведении СМР (надрезы, заломы, следы от удара) на каждый образец ГПАТ. Наименование образцов, их размеры, количество образцов, исходное состояние и вид дефекта, имитирующего СМР, а также количество образцов с дефектами (при наличии) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Наименование образцов, их размеры, количество образцов, исходное состояние и вид дефекта, имитирующего СМР, а также количество образцов с дефектами (при наличии)

№ п/п	Наименование объекта контроля	Маркировка Заказчика	Кол-во образцов	Вид исходного дефекта	Вид дефекта, моделирующего СМР
1	Гибкая армированная металлической лентой труба с фитингами под приварку	СБ-Д1	1	Без дефектов	Без дефектов (для последующих испытаний на разрушение в исходном состоянии)
2		СБ-Д2	1	Без дефектов	Надрез продольный защитного слоя длиной 100 мм на всю толщину слоя, под углом 55° по направлению намотки
3		СБ-Д3	1	Без дефектов	Надрез продольный защитного слоя длиной 100 мм на всю толщину слоя, под углом 55° по направлению намотки
4		СБ-Д4	1	Без дефектов	Надрез продольный защитного слоя длиной 200 мм на всю толщину слоя, под углом 55° по направлению намотки
5		СБ-Д5	1	Без дефектов	Надрез продольный защитного слоя длиной 200 мм на всю толщину слоя, под углом 55° по направлению намотки
6		СБ-Д6	1	Без дефектов	Надрез продольный защитного слоя длиной 300 мм на всю толщину слоя, под углом 55° по направлению намотки
7		СБ-Д7	1	Без дефектов	Залом образца на угол 30°
8		СБ-Д8	1	Без дефектов	Залом образца на угол 40°
9		СБ-Д9	1	Без дефектов	Залом образца на угол 50°
10		СБ-Д10	1	Без дефектов	Удар падающим грузом массой 100 кг (бетонный блок)
11		СБ-Д11	1	Повреждения армирующего слоя	Без дефектов (для последующих испытаний на разрушение в исходном состоянии)

Окончание таблицы 2

№ п/п	Наименование объекта контроля	Маркировка Заказчика	Кол-во образцов	Вид исходного дефекта	Вид дефекта, моделирующего СМР
12	Гибкая армированная металлической лентой труба с фитингами под приварку	СБ-Д12	1	Повреждения армирующего слоя	Надрез продольный защитного слоя длиной 100 мм на всю толщину слоя, под углом 55° по направлению намотки
13		СБ-Д13	1	Повреждения армирующего слоя	Надрез продольный защитного слоя длиной 100 мм на всю толщину слоя, под углом 55° по направлению намотки
14		СБ-Д14	1	Повреждения армирующего слоя	Надрез продольный защитного слоя длиной 200 мм на всю толщину слоя, под углом 55° по направлению намотки
15		СБ-Д15	1	Повреждения армирующего слоя	Надрез продольный защитного слоя длиной 200 мм на всю толщину слоя, под углом 55° по направлению намотки
16		СБ-Д16	1	Повреждения армирующего слоя	Надрез продольный защитного слоя длиной 300 мм на всю толщину слоя, под углом 55° по направлению намотки
17		СБ-Д17	1	Повреждения армирующего слоя	Залом образца на угол 30°
18		СБ-Д18	1	Повреждения армирующего слоя	Залом образца на угол 40°
19		СБ-Д19	1	Повреждения армирующего слоя	Залом образца на угол 50°
20		СБ-Д20	1	Повреждения армирующего слоя	Удар падающим грузом массой 100 кг (бетонный блок)

В качестве средства контроля использовался 32-канальный акустико-эмиссионный измерительный комплекс А-Line 32D (DDM), производства ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ». Для обработки данных и представления результатов контроля использовалось специализированное программное обеспечение «А-Line 32D» (v. 6.07), выпускаемое ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ». Также для регистрации сигналов АЭ в процессе контроля образцов ГПАТ

использовались преобразователи акустической эмиссии (далее по тексту – ПАЭ) типа GT200-01 (производство ООО «ГлобалТест»), GT205 (производство ООО «ГлобалТест»), SR190 (производство ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ»).

2. Результаты экспериментального исследования

Все рассмотренные образцы прошли испытания на рабочем давлении без нарушения целостности. Однако при дальнейшем увеличении уровня давления в системе разрушение происходило на разных уровнях (рис. 1).

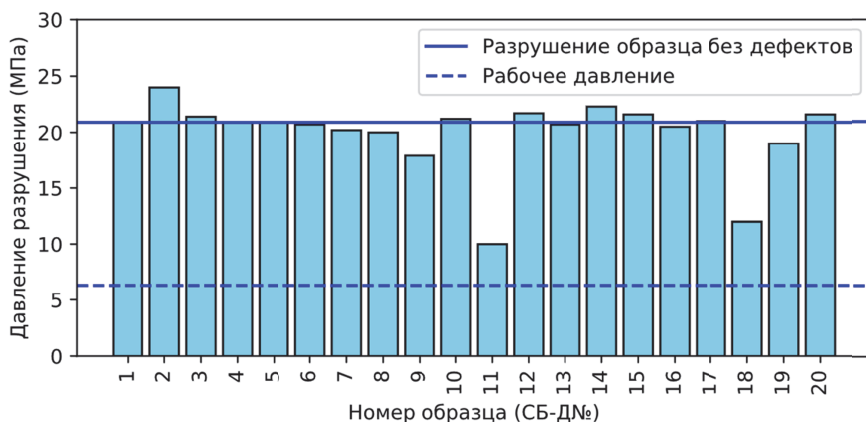


Рис. 1. Значения давления разрушения для каждого из испытанных образцов ГПАТ

Метод АЭ-контроля способен эффективно выявлять события, предшествующие разрушению объекта. При приближении нагрузки к моменту разрушения начинают возрастать по экспоненте активность импульсов АЭ с возрастанием амплитуды сигнала. Прямо перед разрушением образцов ГПАТ активность и амплитуда резко падают, при этом возрастает длительность. Количество принимаемых импульсов АЭ регистрируется в целом значительно меньше, чем при испытании металлических образцов. Прямо перед разрушением какого-либо характерного повторяемого изменения в параметрах АЭ не наблюдается. Однако сам момент разрушения хорошо виден и устойчиво фиксируется.

Самым информативным параметром для определения близости момента разрушения образца ГПАТ является длительность АЭ-сигнала. Рассмотрим образец СБ-ДЗ, общий вид которого до и после разрушения при повторном испытании представлен на рис. 2.



Рис. 2. Образец СБ-Д3 при повторном АЭ-контроле:

***а* – общий вид образца перед испытанием, *б* – вид разрушенного образца**

На рис. 3 видно, что за 2 минуты до разрушения было зафиксировано несколько импульсов с длительностью, превышающей более чем в 11 раз максимальную длительность импульса, зарегистрированного при наборе давления до рабочего. Как показал дальнейший анализ, появление импульса, длительность которого в 3 раза превышает среднюю длительность во время набора давления, является признаком разрушения. Кроме наблюдения непосредственно за длительностью АЭ-сигнала стоит обращать внимание на его среднюю длительность. Группирование нескольких импульсов с небольшим повышением длительности, по сравнению со средним значением, также является признаком начала разрушения. Время усреднения 5 секунд. ПАЭ 1 – синий. ПАЭ 2 – красный.

При этом при испытании образца СБ-Д4 (рис. 4) выявлена ситуация, в которой усредненная длительность АЭ-импульсов более показательна, чем длительность отдельного импульса.

Рис. 5 демонстрирует, что за 3 минуты до разрушения начинается фиксация постепенно возрастающей средней длительности на первом канале (синий цвет). Также в этот промежуток фиксируется единичное значительное возрастание на втором канале (красный цвет). График же длительности отдельных импульсов от времени в данном случае читается хуже.

Возрастание активности импульсов АЭ, зафиксированное на образце СБ-Д6 (рис. 6), тоже является признаком разрушения с учетом верно подобранного времени усреднения.

На рис. 7 за 2 минуты до разрушения отчетливо видно возрастание активности АЭ-сигналов. Время усреднения 5 секунд. Сигналы, регистрируемые ПАЭ 1, указаны синим цветом, сигналы, зарегистрированные ПАЭ 2, – красным цветом.

Рассмотрим наименее стойкие образцы. Образец СБ-Д11 не имел заранее нанесенных дефектов, однако в нем был скрытый дефект армирующего слоя (рис. 8).

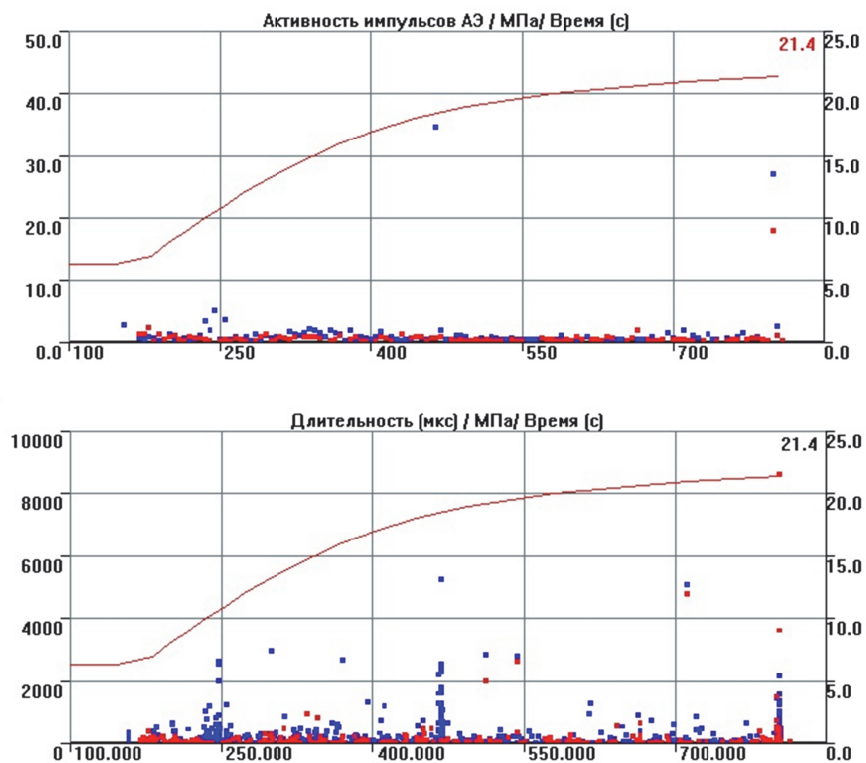


Рис. 3. Графики изменения активности и длительности АЭ-импульсов при избыточной нагрузке (для образца СБ-Д3)



Рис. 4. Образец СБ-Д4 при повторном АЭ-контроле:
 а – общий вид образца перед испытанием, б – вид разрушенного образца

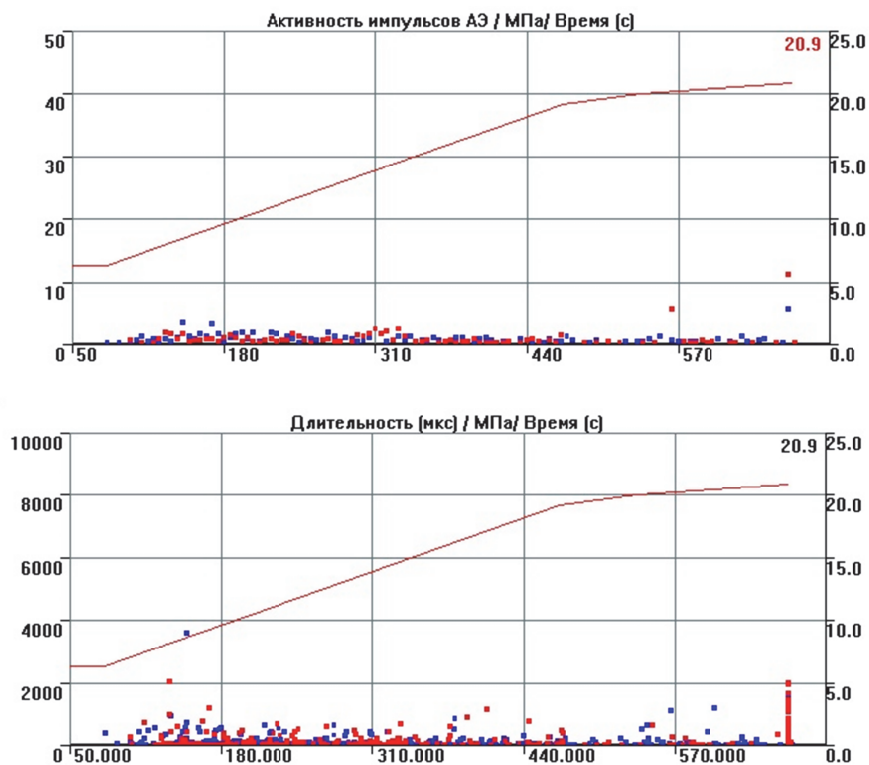


Рис. 5. Графики изменения активности и длительности АЭ-импульсов при избыточной нагрузке (для образца СБ-Д4)



Рис. 6. Образец СБ-Д6 при повторном АЭ-контроле:
 а – общий вид образца перед испытанием, б – вид разрушенного образца

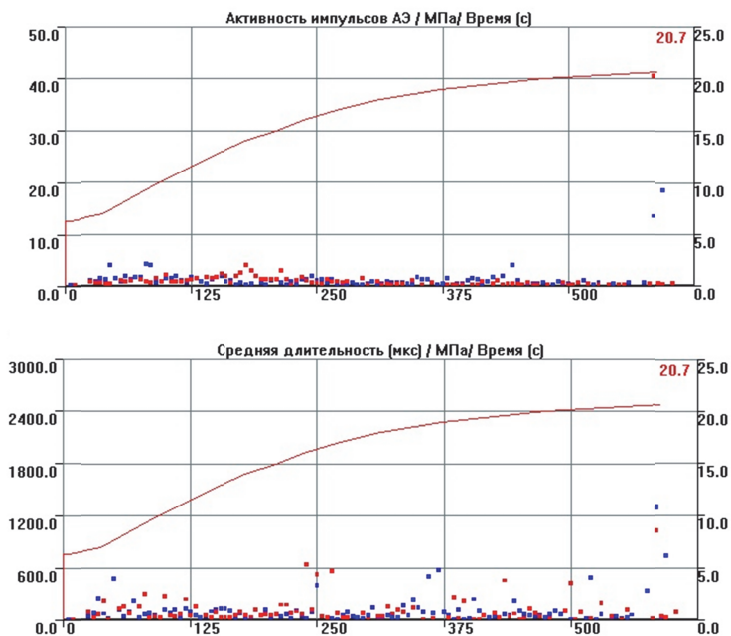
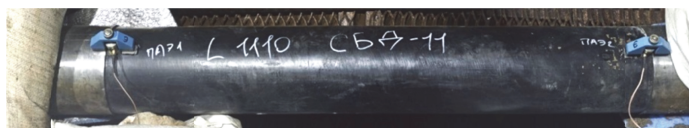
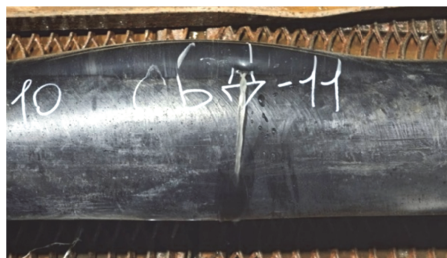


Рис. 7. График изменения активности АЭ-импульсов при избыточной нагрузке (для образца СБ-Д6)



a



б

Рис. 8. Образец СБ-Д11 при повторном АЭ-контроле:
a – общий вид образца перед испытанием, *б* – вид разрушенного образца

Разрушение произошло по центру на 10 МПа (рис. 9). После падения давления с 10 МПа до 7,5 МПа, были слышны щелчки, которые были интерпретированы, как развивающиеся повреждения внутри трубы.

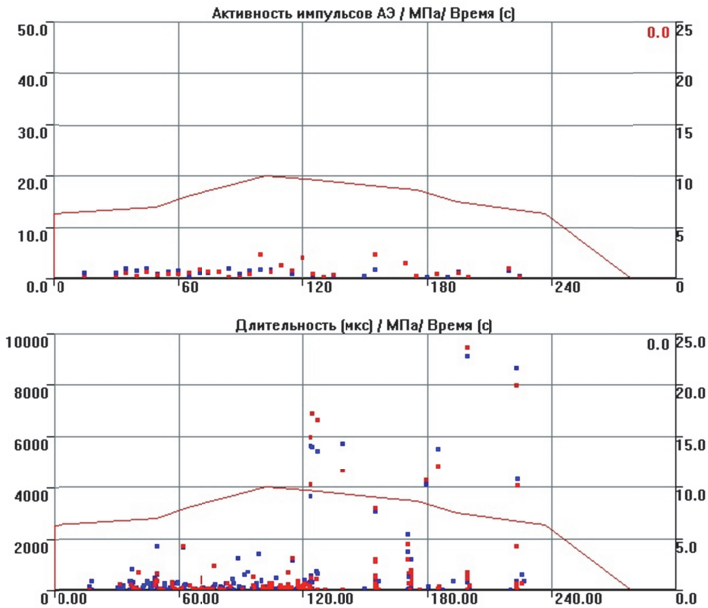


Рис. 9. График изменения активности АЭ-импульсов при избыточной нагрузке (для образца СБ-Д11)

Основная часть сигналов относится к периоду после начала падения давления. Сигналы лоцируются в центре, в районе дефекта.

В свою очередь образец СБ-Д18 имел залом под углом 40 градусов (рис. 10). Разгерметизация внутреннего лайнера трубы произошла на давлении 12 МПа, после чего давление сначала упало до 11,4, а потом опустилось до атмосферного. Место разгерметизации соответствует месту залома.



**Рис. 10. Образец СБ-Д18 при повторном АЭ-контроле:
а – общий вид образца перед испытанием, б – вид разрушенного образца**

Почти все сигналы в локации относятся к периоду после начала падения давления. Здесь по мере приближения к разрушению амплитуда и длительности сигнала возрастали, имея максимум в момент разрушения (рис. 11).

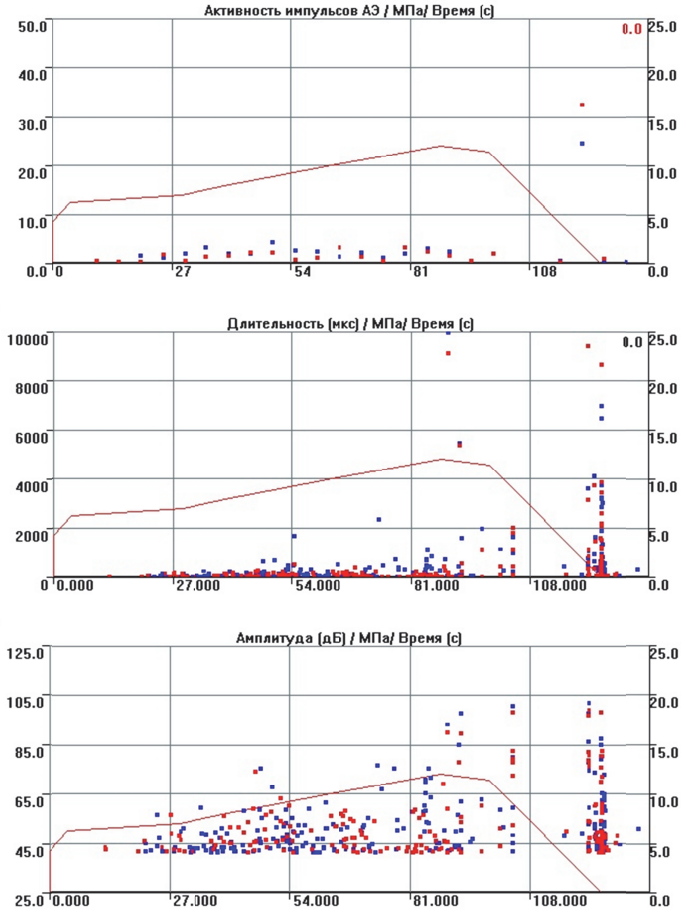


Рис. 11. График изменения активности АЭ-импульсов при избыточной нагрузке (для образца СБ-Д11)

Несмотря на то, что предсказать точный момент разрушения конкретного образца ГПАТ на данный момент сложно, некоторые АЭ-параметры выступают признаками того, что в образце начинаются деградационные процессы.

Вывод

Анализ графиков показал, что многослойная конструкция ГПАТ является надежной, так как даже при наличии очевидных дефектов разрушение происходило только при многократном превышении допустимого рабочего давления. При этом процесс разрушения сопровождался акустической активностью, что позволяет применять метод АЭ-контроля. Стоит отметить, что при аналогичных типах искусственно нанесенных дефектов общий характер АЭ-активности также был схожим, что свидетельствует о потенциальной возможности различения характера повреждения. Таким образом, АЭ метод контроля может быть применим для контроля технического состояния линейных трубопроводов из ГПАТ.

Сопоставив результаты гидравлических испытаний, можно сделать вывод, что в данной выборке наибольшее негативное влияние оказывает тип дефекта «залом». Однако четкой зависимости влияния угла залама на характеристики ГПАТ выявлено не было.

В качестве дальнейшего развития направления работ было выделено испытание в полевых условиях участков, находящихся в эксплуатации. Разрушение ГПАТ при эксплуатации чаще всего вызвано коррозией армирующего слоя. Из-за отсутствия защиты от статического электричества внутренняя пластиковая оболочка накапливает заряд в местах повреждений. При сквозном разрушении внутреннего слоя заряд переходит на армирующий слой и запускает электрохимическую коррозию – особенно быстро в зонах с тонкими металлическими нитями или лентами. Искусственно воспроизвести такой дефект сложно.

Список литературы

1. Федотова, А.В. Моделирование в лабораторных условиях механизмов разрушения труб из гибких и жестких полимерно-армированных материалов, применяемых в нефтегазовой отрасли / А.В. Федотова, К.А. Перов, М.В. Богатов // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2024. № 6. С. 47–61.
2. Лебедь, А.Д. Определение надежности конструкций полимерно-армированных трубопроводов в условиях промышленного транспорта нефтепродуктов / А.Д. Лебедь, М.В. Терентьева // *Нефть и газ – 2025: сборник трудов 79-й Международной молодежной научной конференции*, Москва, 21–25 апреля 2025 года. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина. 2025. С. 191–198.
3. Червова, В.В. Полимерная армированная труба с изолированными стальными лентами и способ ее диагностики / В.В. Червова, В.Д. Ворончихин, А.А. Червов // *Электронный научный журнал Нефтегазовое дело*. 2025. № 4. С. 169–181.
4. Алиев, М.И. Особенности выбора конструкции гибких полимерных армированных труб с несвязанными слоями в составе промышленных трубопроводов / М.И. Алиев // *Нефтяное хозяйство*. 2025. № 3. С. 116–120.

5. ГОСТ Р 70623-2023. Трубопроводы промышленные. Трубопроводы из гибких полимерных армированных труб. Правила проектирования, монтажа и эксплуатации. М.: Российский институт стандартизации, 2024. 58 с.
6. СП 284.1325800.2016. Трубопроводы промышленные для нефти и газа. Правила проектирования и производства работ. М.: Минстрой России, 2016. 199 с.
7. ГОСТ Р 52727-2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2007. 11 с.

УДК 534.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В НЕФТЕПРОВОДАХ И РЕЗЕРВУАРАХ

Живоносновская Д.М.¹, Харебов К.В.¹, Мишунин В.С.¹, Суслов А.В.²

¹Общество с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр «ЭгидА», Самара, Россия. E-mail: aegis-rus@aegis-rus.com

²Самарский государственный технический университет, Самара, Россия. E-mail: a.v.suslov@inbox.ru

В статье приведены результаты исследования возможности применения метода акустической эмиссии для определения толщины асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) в нефтепроводах и резервуарах, предназначенных для хранения нефтепродуктов. Рассмотрены основные механизмы формирования АСПО и факторы, влияющие на геометрию нарастания слоя. Дан обзор методов, применяющихся для контроля толщины АСПО, среди которых в качестве наиболее перспективного выделен метод акустической эмиссии. Приведены теоретические основы проведенного исследования и описание методики измерения, включающей схему экспериментальной установки и алгоритм исследования, заключающийся в выполнении серии измерений от минимальной до максимальной амплитуды имитирования при использовании нескольких типов преобразователей акустической эмиссии для ряда толщин АСПО. Выполнен комплексный анализ и метрологическая оценка полученных данных, показавшие возможность определения толщины слоя АСПО методом акустической эмиссии.

Ключевые слова: асфальтосмолопарафиновые отложения, метод неразрушающего контроля, акустическая эмиссия, нефтепровод, резервуары

Введение

Трубопроводный транспорт углеводородов является одним из самых распространенных (до 95 %) методов транспортировки нефтепродуктов как в РФ, так и за границей [1]. В связи с массовостью применения и спецификой нефтяной промышленности, к нефтепроводам предъявляется ряд требований, связанных с технологическими особенностями и безопасностью их эксплуатации. В частности, при добыче и транспортировке нефтепродуктов с высоким содержанием парафинов, одной из основных проблем является загрязнение как самих трубопроводов, так и смежного оборудования асфальтосмолопарафиновыми отложениями (АСПО) [2].

АСПО представляют собой сложную смесь, состоящую в основном из углеводородов метанового ряда (смесь твердых парафиновых углеводородов состава $C_{17}H_{36}$ – $C_{36}H_{74}$ и гибридных углеводородов (церезинов

алкано-нафтенового строения состава $C_{36}H_{74}-C_{71}H_{144}$) и асфальтосмолистых соединений, силикагелевых смол, масел, воды и механических примесей. Технический парафин представляет собой смесь парафинов (10–75 %), смол (10–30 %), асфальтенов (2–5 %) и связанной нефти (до 60 %) [3]. Конкретный состав зависит от многих факторов и варьируется в зависимости от характеристик месторождения и предыдущих условий транспортировки. Например, в таблице, приведенной в источнике [4] даны примерные составы АСПО в скважинах Бобровского и Покровского месторождений. В связи с непостоянностью химического состава физические характеристики АСПО также изменяются. Согласно исследованию [4] плотность парафинов в твердом состоянии колеблется от 865 до 940 кг/м³, а в расплавленном – от 777 до 790 кг/м³. При этом высокомолекулярные парафины от $C_{37}H_{74}$ до $C_{53}P_{108}$ (церезины) имеют более высокую температуру кипения и обладают большей молекулярной массой и плотностью. Как правило, в нефти содержится небольшое количество асфальтенов (2–5 %), однако в зависимости от месторождения содержание может быть и выше. Так в безводных туймазинских нефтях оно составляет 4,4–8,0 % по массе, а в обводненных – 7,8–8,3 %. При этом их плотность колеблется в пределах 1000 кг/м³.

Принцип образования парафиновых отложений на данный момент до конца не изучен, однако исследователи выделяют три основных механизма [5]:

- осадочно-объемную теорию, согласно которой кристаллы парафина образуются в объеме потока и постепенно оседают на внутренней поверхности оборудования;

- кристаллизационно-поверхностную теорию, согласно которой кристаллизация парафина происходит непосредственно на поверхности оборудования;

- смешанный принцип возникновения АСПО [2].

К общепринятым механизмам, потенциально влияющим на образования парафиновых отложений на поверхности промышленного оборудования, относятся: молекулярная диффузия, сдвиговые воздействия (сдвиговая дисперсия и сдвиговое удаление), термодиффузия, гравитационное осаждение, броуновское движение. При этом тремя основными условиями возникновения АСПО можно назвать [3, 5]:

- присутствие в добываемой продукции асфальтосмолопарафиновых веществ, способных к осаждению;

- снижение температуры потока до температуры насыщения нефти парафином, при которой появляются первые его кристаллы (температуры помутнения) [5];

- достаточно прочное сцепление парафиновых отложений с поверхностью трубопровода, исключающее возможность смыва отложений потоком нефти.

В связи с сильным влиянием температуры на интенсивность отложения, наибольший слой отложений, как правило, наблюдается в зоне охлаждения продукта в верхней части трубопровода и убывает по мере удаления от начала трубопровода. Структура АСПО по сечению трубы состоит из двух слоев: нижнего равномерного твердого плотного слоя, состоящего из твердых кристаллов парафина, и верхнего, неравномерного по толщине, состоящего из рыхлой взвеси и шлама [6]. По мере увеличения слоя сокращается объем перекачки, а под отложениями инициируются коррозионные процессы, приводящие к металлоотслоению и, как следствие, к загрязнению перекачиваемого нефтепродукта после удаления отложений. Все это приводит к необходимости своевременных периодических очисток внутренних полостей труб нефтепроводов [7]. В зависимости от опыта эксплуатации и группы нефтепроводов устанавливается периодичность их очистки от АСПО. Обычно периодичность очистки составляет не менее 1 раза в 90 суток и сокращается вплоть до 1 раза в 30 суток [6]. Даже при условии перекачки одного и того же сырья межочистный период является достаточно сложно прогнозируемой величиной, зависящей от термобарических условий конкретного трубопровода. В работе [1] было проведено исследование, показавшее нелинейный характер изменения межочистного периода в течение года, связанный с нелинейностью изменения температуры грунта на глубине заложения нефтепровода. В связи с этим межочистные периоды обычно выбираются с запасом, что приводит к увеличению количества ежегодных плановых периодических очисток, требующих полной остановки нефтепровода.

Точное определение толщины парафинового слоя позволит не только увеличить межочистные периоды, но и дифференцировать причины снижения потока, которые могут заключаться как в чрезмерном слое АСПО, так и в неисправности насосного оборудования. Также немаловажной проблемой является образование АСПО на стенках резервуаров для хранения нефтепродуктов. Как и в случае с трубопроводом, механизм образования достаточно похож и основан на изменении термобарических характеристик внешней и внутренней среды. При этом основным последствием чрезмерного накопления отложений будет являться изменение внутреннего объема сосуда, что приведет к невозможности точного учета хранимого в резервуаре продукта.

1. Обзор и описание методов контроля

Как говорилось ранее, специфика нефтедобывающей промышленности предполагает соблюдение ряда норм. В связи с этим, ранее различными исследовательскими группами проводились изыскания по выявлению требований к измерительным приборам, используемым для контроля

нефтепроводов. В частности, в работе [8] сформулированы требования к средствам измерения толщины АСПО, дополнив которые можно получить универсальные критерии:

- метод измерения должен относиться к неразрушающим методам контроля;
- метод измерения должен быть применим к широкому диапазону диаметров трубопроводов и толщин отложений;
- метод должен быть достоверным и независимым от воздействия факторов окружающей среды и влияния технологического процесса;
- метод должен соответствовать требованиям и нормам, применимым к объекту контроля и предприятию, на территории которого он расположен.

Метод измерения толщины АСПО может быть основан на различных физических явлениях. В частности, могут быть использованы ультразвуковые (основанные на измерении затухания или скорости распространения ультразвукового импульса), радиационные и тепловые методы, а также методы, основанные на их комбинациях [8]. Наиболее распространенным способом контроля средней толщины АСПО является метод, основанный на расчете разницы давлений на входе и выходе трубопровода, которая увеличивается по мере нарастания слоя АСПО [1]. Также средняя толщина отложений может быть рассчитана исходя из изменения температуры транспортируемого продукта (метод основан на исследованиях теплоизоляционных свойств АСПО), измерениях толщины слоя зондами, вводимыми в область трубопровода, или после проведения очистки путем взвешивания изъятых массы [5].

Все вышеприведенные методы имеют ряд недостатков, основными из которых являются сложность реализации в соответствии с нормами, предъявляемыми к предприятиям нефтяной промышленности (тепловой, радиационный), необходимость остановки процесса перекачки (метод измерения температуры продукта, зондовый метод и метод взвешивания) и невозможность дифференцировать причину изменения значимого параметра (метод, основанный на изменении давления, которое может быть вызвано не только наличием АСПО, но и неисправностью насосного оборудования). Наиболее перспективным является контроль с использованием звуковых импульсов. При этом упомянутый ультразвуковой контроль, основанный на анализе прошедшего и отраженного от АСПО импульса, сильно зависит от характеристик технологического процесса. В частности, наличие кавитационных пузырьков может значительно повлиять на результаты контроля.

Также стоит отметить, что важной особенностью контроля АСПО в резервуарах, по сравнению с аналогичными исследованиями трубопроводов, является техническая возможность визуального контроля при

периодической очистке резервуара и невозможность применения методов, основанных на контроле изменения давления. Однако визуальные методы не позволяют проводить текущий контроль толщины АСПО без слива хранящего продукта, что делает невозможной корректировку графика плановой очистки резервуара.

В связи с этим рассмотрена возможность применения метода акустической эмиссии для определения толщины АСПО в нефтепроводах и резервуарах. В данной работе в основе рассматриваемого метода лежит физическое явление излучения волн напряжений при быстрой локальной перестройке структуры материала, вызванной механическим воздействием на поверхность контролируемой трубы, заполненной АСПО различной толщины. Метод акустической эмиссии является достаточно гибким методом с широким спектром применимости и позволяет проводить контроль в широком частотном диапазоне (3–500 кГц). Классическим способом применения метода является дефектоскопия материалов, например, регистрация роста трещин и развития локальных деформаций, кристаллизации, течеобразований и фазовых переходов [9].

Преимуществами данного метода являются:

- отсутствие разрушающего воздействия на объект контроля;
- независимость от конфигурации объекта контроля;
- независимость от параметров окружающей среды и технологического процесса;
- возможность использования на предприятиях нефтяной промышленности;
- возможность применения метода не только для измерения текущей толщины АСПО, но и для отслеживания динамики изменения слоя;
- возможность получения быстрого результата при необходимости выяснения причины снижения давления в нефтепроводе при равной вероятности как образования АСПО, так и выхода из строя насосного оборудования.

2. Теоретическая часть

Полная модель распространения акустической волны, возбуждаемой единичным акустическим импульсом, в объеме и по поверхности твердого тела достаточно сложна и изучена не в полной мере. Рассмотрим пример, где в качестве объекта контроля выступает круглая стальная труба диаметром 160 мм с толщиной стенки 5 мм, а в качестве зондирующего сигнала акустический импульс с частотой повторения 1 Гц, возбуждаемый точечным источником акустического сигнала. Рассчитаем критическую частоту появления первой высшей моды: $f_{кр} \approx Ct / 2h \approx 320$ кГц. Таким образом, на рассмотренных частотах в стенке пустой (заполненной воздухом) стальной трубы будут возникать нормальные волны (волны Лэмба):

- нулевые моды (симметричная S_0 и антисимметричная A_0);
- крутильные волны – не имеют дисперсии.

Скорость симметричной волны Лэмба будет наивысшей и составит примерно 5300–5400 м/с. Антисимметричная же волна Лэмба будет распространяться со скоростью ≈ 2300 –2500 м/с и иметь большую дисперсию. При импульсном характере, описанном в примере, это означает, что низкие частоты импульса будут отставать от высоких и импульс будет быстро расширяться. Крутильная же волна будет иметь наименьшую дисперсию и скорость порядка 3100–3200 м/с. При этом, исходя из геометрических параметров трубы, ее локально можно рассмотреть как тонкую пластину.

Фазовая скорость пришедшего в приемник сигнала будет зависеть от частоты и волнового числа по формуле

$$V_{\Phi} = \frac{\omega}{k}, \quad (1)$$

где ω – угловая частота;

k – волновое число.

Рассмотрим вывод уравнений для тонкой пластины, колеблющейся в свободном пространстве. Волновое число, определяемое из характеристических уравнений для продольной (2) и поперечной (3) моды, можно записать в следующем виде [10, 11]:

$$(k^2 + q^2)^2 \cdot ch(pd)sh(qd) - 4k^2pq \cdot sh(pd)ch(qd) = 0; \quad (2)$$

$$(k^2 + q^2)^2 \cdot sh(pd)ch(qd) - 4k^2pq \cdot ch(pd)sh(qd) = 0, \quad (3)$$

где d – 1/2 толщины пластины;

p и q – произвольные постоянные для симметричных S_0 и антисимметричных A_0 волн соответственно:

$$p = \sqrt{k^2 - k_i^2}; \quad q = \sqrt{k^2 - k_t^2}. \quad (4)$$

При этом волновые числа симметричной и антисимметричной волн зависят от свойств материала трубы:

$$k_i = \omega \sqrt{\frac{\rho}{\lambda + 2\mu}}; \quad k_t = \omega \sqrt{\frac{\rho}{\mu}}. \quad (5)$$

Здесь ρ – плотность материала, а μ и λ – параметры Ламе:

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}; \quad \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad (6)$$

где E – модуль Юнга;

ν – коэффициент Пуассона.

При наличии слоя парафина вид уравнений усложняется из-за акустического импеданса парафина. Стенка перестает быть свободной и часть энергии уходит в прилегающий слой [11].

Для нулевой симметричной моды волны Лэмба S_0

$$(k_2^2 + q_2^2)^2 \cdot \text{cth}(p_2 d) - 4k_2^2 p_2 q_2 \cdot \text{cth}(q_2 d) = \frac{\rho_{\text{П}}}{\rho_{\text{М}}} \cdot \frac{p_2 k_t^4}{\sqrt{k_{\text{П}}^2 - k_2^2}} \cdot \text{tg}(h \cdot (\sqrt{k_{\text{П}}^2 - k_2^2} + i\alpha)). \quad (7)$$

Для нулевой асимметричной моды волны Лэмба A_0

$$(k_2^2 + q_2^2)^2 \cdot \text{th}(p_2 d) - 4k_2^2 p_2 q_2 \cdot \text{th}(q_2 d) = \frac{\rho_{\text{П}}}{\rho_{\text{М}}} \cdot \frac{p_2 k_t^4}{\sqrt{k_{\text{П}}^2 - k_2^2}} \cdot \text{tg}(h \cdot (\sqrt{k_{\text{П}}^2 - k_2^2} + i\alpha)), \quad (8)$$

где $\rho_{\text{П}}$ – плотность парафина;

$\rho_{\text{М}}$ – плотность металла;

k_2 – поперечные и продольные волновые числа в пластине с учетом влияния парафина;

k_t – поперечное волновое число для свободной пластины;

p_2, q_2 – произвольные постоянные для нагруженной пластины;

h – толщина слоя парафина;

α – коэффициент затухания парафина;

$k_{\text{П}} = \omega / C_{\text{П}}$ – волновое число в парафине;

$C_{\text{П}}$ – скорость звука в парафине.

Крутильная волна слабо зависит от частоты и толщины стенки и ее скорость примерно равна скорости поперечной волны в металле 3100–3200 м/с. Стоит отметить, что на частотах 100–200 кГц высшие моды крутильной волны возникать не будут.

Для удобства сравнения затухания волн был введен параметр ослабления волны – коэффициент затухания, складывающийся из коэффициентов поглощения ($\delta_{\text{п}}$) и коэффициентов рассеяния ($\delta_{\text{р}}$):

$$\delta = \delta_{\text{п}} + \delta_{\text{р}}. \quad (9)$$

В отличие от коэффициента поглощения, зависящего от плотности и пористости материала, коэффициент рассеяния в основном зависит от среднего размера неоднородностей и расстояния между ними. В контексте металлов основное влияние будет иметь средний размер кристаллитов. При длине волны меньшей или равной среднему размеру кристаллитов, коэффициент рассеяния пропорционален биквадрату частоты колебаний (Рэлеевское рассеяние), тогда коэффициент затухания принимает вид (10):

$$\delta = Af + Bf^4 D^3, \quad (10)$$

где D – средний размер кристаллов;

A и B – постоянные;

f – частота колебаний.

При малых частотах Af имеет превалирующее значение, в области δ_p пропорционален, а в разнородных металлах показатель степени при f меняется от 2 до 4 [12].

При этом также значительную роль играет геометрическое затухание, увеличивающееся по мере удаления от источника. Для рассмотренных волн данное затухание составит:

$$W = \frac{W_0}{\sqrt{r}}, \quad (11)$$

где W_0 – амплитуда исходного сигнала;

r – расстояние.

Таким образом, на скорость распространения и ослабления акустической волны влияют механические параметры среды, которые в общем виде можно определить как волновое сопротивление или импеданс, частота волны, толщина объема h и расстояния от источника излучения до приемника. Однако несколько типов волн могут иметь схожие скорости, что затрудняет их разделение при обработке полученных в процессе проведения экспериментального исследования данных. При этом параметры акустической волны или импульса также зависят от наличия дополнительных слоев (например, антикоррозийное покрытие трубопровода или твердая фаза АСПО), геометрических искажений трубы, врезок и ответвлений, дефектов и т. п. В связи с этим с практической точки зрения составление калибровочной матрицы и эмпирически полученных поправочных коэффициентов может быть более эффективным решением, чем составление полного уравнения распространения волн.

3. Описание методики измерения

На текущем этапе исследования поставлен ряд практических задач:

1. Определение значимых параметров контроля.
2. Получение эмпирической зависимости значимых параметров от увеличения слоя отложений.
3. Подбор оптимальных типа датчика, амплитуд имитирования и цифрового фильтра.

Для решения поставленных задач был сконструирован испытательный стенд, функциональная схема которого показана на рис. 1.

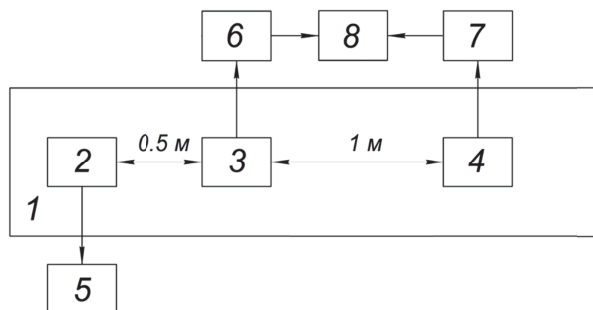


Рис. 1. Функциональная схема испытательного стенда:
 1 – участок трубопровода; 2, 3, 4 – преобразователи акустической эмиссии;
 5 – имитатор; 6, 7 – усилители 20 дБ; 8 – прибор «Юнископ»

Экспериментальный стенд представляет собой участок трубопровода с внешним диаметром 160 мм и толщиной стенки 5 мм с установленной на нем акустической измерительной системой, представляющей собой три преобразователя акустической эмиссии (ПАЭ), один из которых подключался к имитатору акустико-эмиссионных сигналов, остальные два через усилители в 20 дБ к измерительному прибору «Юнископ», используемому в качестве портативного акустико-эмиссионного комплекса. Для установки ПАЭ, поверхность была очищена от загрязнений и краски, а поверхность металла зашлифована до шероховатости не хуже Rz 40.

В качестве имитатора использовался пьезоэлектрический имитатор импульсов акустической эмиссии производства ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ». Сигнал имитатора представляет собой импульс с определенной амплитудой. Он возбуждает колебания в пьезоэлементе преобразователя акустической эмиссии, который, в свою очередь, возбуждает колебания в объекте. Таким образом, характер возбуждаемого в объекте сигнала зависит от амплитуды имитирования, выставленной в настройках имитатора, и от характеристик преобразователя акустической эмиссии.

Настройки имитатора:

- фиксированные:
 - частота имитации: 1 Гц;
- изменяемые в ходе эксперимента:
 - амплитуда имитирования: от 30 до 300 вольт с шагом в 30 вольт.

Настройки акустико-эмиссионного комплекса:

- фиксированные:
 - порог дискриминации: 55 дБ;
 - интервал контроля импульса: 2 000 мкс;
 - мертвое время: 2 мкс (фиксированное).

В лабораторных условиях такие параметры позволяют четко выделять каждый имитируемый раз в секунду импульс.

– изменяемые в ходе эксперимента:

- цифровой фильтр: 30–500 кГц или без фильтра.

Преобразователи акустической эмиссии использовались двух типов «GT200-01» и «З-60». Они менялись в ходе эксперимента. Для имитации использовался тот же тип преобразователя, что и для приема сигналов. Технические характеристики ПАЭ GT200-01 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики ПАЭ модели GT200-01

Параметр	Значение
Диапазон рабочих частот, кГц	от 100 до 200
Коэффициент электроакустического преобразования на резонансной частоте (относительно 1 В/(м/с)) $K_{p,max}$, дБ, не менее	60
Пределы допускаемой относительной погрешности электроакустического преобразования на резонансной частоте $K_{p,max}$, %	±25
Электрическая емкость, пФ, не менее	360
Сопротивление изоляции между контактами и корпусом разъема, не менее, Ом	100
Электрическое сопротивление изоляции, не менее, МОм	500
Резонансная частота	180 кГц

Методика измерения представляла собой последовательное выполнение следующего алгоритма (рис. 2).

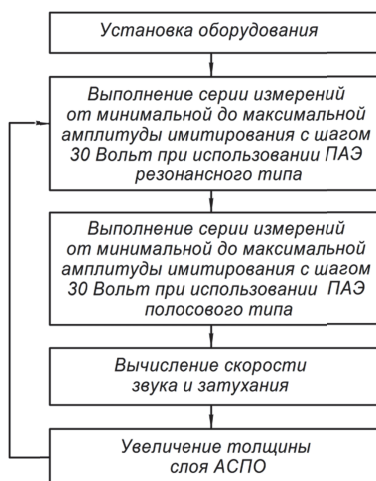


Рис. 2. Алгоритм проведения экспериментальных исследований

4. Результаты экспериментального исследования

В результате проведения серии экспериментов был получен массив данных для толщин АСПО от 0 мм до 35 мм. Аналитический анализ показал, что средняя скорость по старту импульса не применима для разрабатываемой методики контроля в связи с нелинейной зависимостью данного параметра от толщины слоя АСПО.

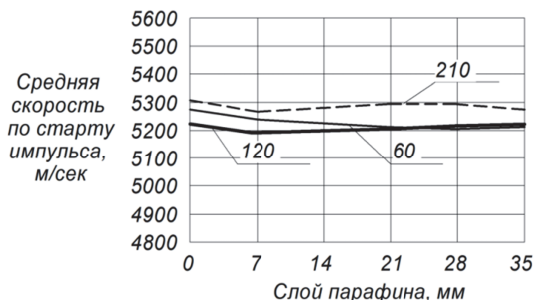


Рис. 3. Средняя скорость по старту импульса на резонансом ПАЭ GT200-01 с цифровым фильтром 30–500 кГц

У резонансного GT200-01 средняя скорость по максимуму не зависит от амплитуды имитации и при этом имеет зависимость, позволяющую однозначно вычислить текущий слой. При этом на графике видны небольшие осцилляции, связанные с четвертьволновыми и полуволновыми резонансами, что хорошо объясняется выражениями (7)–(8).

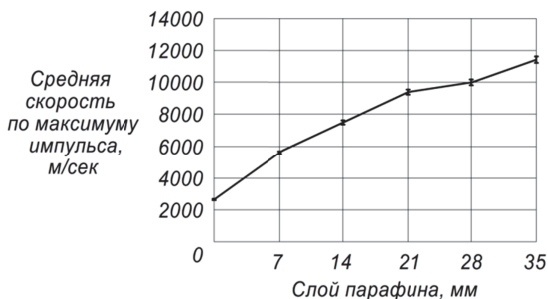


Рис. 4. Средняя скорость по максимуму импульса на резонансом ПАЭ GT200-01 с цифровым фильтром 30–500 кГц

При опытах с полосовой конфигурацией данные получились неоднозначными, что не позволяет выделить среднюю скорость по максимуму как значимый параметр для данного типа ПАЭ. Здесь отчетливо видны

резонансы и переход к стадии, когда добавочная масса парафина приводит к общему снижению скорости.

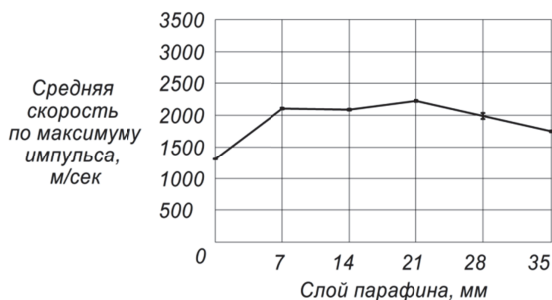


Рис. 5. Средняя скорость по старту импульса на полосовом ПАЭ «З-60»

Стоит упомянуть, что «Измерение средней скорости по максимуму» является встроенной функцией измерительного прибора и представляет собой время прохождения импульса между зафиксированными максимумами на 1 и 2 приемнике, разделенное на расстояние. Как видно на рис. 4, скорость выглядит физически неправдоподобной. Это происходит из-за дисперсии и наложения мод, когда измеряется перемещение фазового максимума внутри деформирующегося импульса, а не реальный перенос энергии, что математически позволяет фазовой скорости превышать скорость звука в объеме металла. Данный тип измерения сам по себе не является стабильным, однако может служить дополнительным источником информации при анализе более однозначных параметров.

Наиболее характерным является параметр затухания сигнала. Данный параметр при обеих конфигурациях ПАЭ не зависит от амплитуды имитирования и позволяет довольно однозначно определить текущий уровень АСПО. При этом для процесса характерны небольшие осцилляции и переход в плато при высоких значениях толщины АСПО.

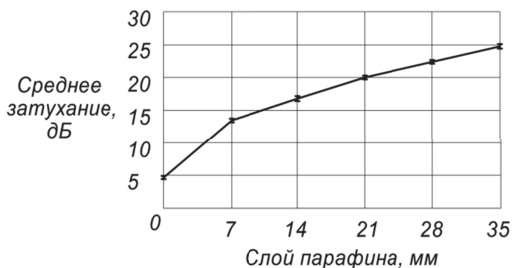


Рис. 6. Среднее затухание на резонансном ПАЭ GT200-01 с цифровым фильтром 30–500 кГц

Ниже приведен метод расчета полной погрешности Δx для параметра x .
 Θ_x – приборная погрешность.

В случае если x прямо измеряемая величина, приборная погрешность Θ_x указывается производителем устройства.

В случае если x вычисляемая величина:

$$\Theta_x = \Theta(X(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial X}{\partial \alpha_i} \cdot \Theta_{\alpha_i} \Big|_{\alpha_1, \dots, \alpha_m} \right)^2}, \quad (12)$$

где $X(\alpha_1, \dots, \alpha_m)$ – функция расчета величины через измеряемые величины;
 $\alpha_1, \dots, \alpha_m$ – измеряемые величины, через которые рассчитывается X .

Для каждого полученного значения величины в выборке определяется приборная погрешность. За приборную погрешность для выборки берется максимальное значение из рассчитанных.

σ_x – стандартное (среднеквадратичное) отклонение. Стандартное отклонение рассчитывалось с использованием несмещенной оценки дисперсии из-за особенностей стандартной функции в «GoogleTables».

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (13)$$

где x_i – i -тое значение величины в выборке;

\bar{x} – среднее арифметическое величины в выборке;

n – количество значений в выборке;

K_x – коэффициент Стьюдента, вычисленный с помощью обратной функции двустороннего распределения вероятностей Стьюдента.

S_x – случайная погрешность:

$$S_x = K_x \sigma_x. \quad (14)$$

Δ_x – полная погрешность:

$$\Delta_x = \sqrt{S_x^2 + \Theta_x^2}. \quad (15)$$

Доверительная погрешность $P = 95 \%$. Результаты расчетов отображены на рис. 3–7 в виде планок погрешности для каждой точки.

Заключение

Обзорный анализ способов и средств контроля толщины АСПО показал, что наиболее оптимальным является метод акустической эмиссии, так как он относится к неразрушающему типу, не зависит от конфигурации объекта контроля, параметров окружающей среды и технологического процесса, а его специфика не только допускает использование на объектах

нефтяной отрасли, но и подходит как для единичного измерения, так и для постоянного контроля.

Выявлено, что на параметры пришедшего акустического сигнала влияют механические параметры среды, частота и амплитуда исходного сигнала, толщина стенки объекта контроля и отложений и расстояния от источника излучения до приемника.

Собран испытательный стенд, состоящий из отрезка трубопровода с диаметром 150 мм и комплекта стандартного измерительного оборудования, включающего преобразователи акустической эмиссии и прибор «Юнископ». При анализе данных, полученных в ходе проведения экспериментального определения влияния толщины АСПО на характеристики звукового сигнала, прошедшего по поверхности тестового объекта, был решен ряд принципиальных вопросов, являющихся целью данного исследования. Было определено, что наибольшая точность измерения может быть достигнута за счет комбинированного анализа скорости по максимуму и затухания, пришедшего в приемник (пьезоэлектрический преобразователь акустической эмиссии резонансного типа) акустического сигнала.

Таким образом, было проведено практическое исследование, подтверждающее возможность использования серийно изготавливаемого акустико-эмиссионного оборудования при контроле толщины АСПО. Предполагается развитие данной темы, заключающееся в проведении полевых испытаний метода на объектах нефтедобывающего комплекса.

Список литературы

1. Илюшин, П.Ю. Методика прогнозирования межочистного периода линейного трубопровода / П.Ю. Илюшин, К.А. Вяткин, А.В. Козлов // Экспозиция Нефть Газ. 2021. № 3. С. 44–48. DOI: 10.24412/2076-6785-2021-3-44-48.
2. Грязнова, Е.С. Основные причины и факторы, влияющие на процесс образования асфальтосмолопарафиновых отложений / Е.С. Грязнова // Вестник науки. 2022. № 12 (57). С. 359–362.
3. Иванова, Л.В. Асфальтосмолопарафиновые отложения в процессах добычи, транспорта и хранения / Л.В. Иванова, Е.А. Буров, В.Н. Кошелев // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2011. № 1. С. 268–284.
4. Персиянцев, М.Н. Добыча нефти в осложненных условиях / М.Н. Персиянцев. М.: ООО «Недра Бизнесцентр», 2000. 653 с.
5. Коробов, Г.Ю. Механизмы образования асфальтосмолопарафиновых отложений методики исследования / Г.Ю. Коробов, Д.В. Парфенов // Neftegaz.RU. 2022. № 8 (128). С. 22–28.
6. ГОСТ 34182-2017. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Эксплуатация и техническое обслуживание. Основные положения: межгосударственный стандарт: [дата введения 01.03.2018]. М.: Стандартинформ, 2019. 62 с.

7. Афанасьев, С.В. Очистка магистральных трубопроводов сложной конфигурации и переменного диаметра от отложений / С.В. Афанасьев, В.А. Волков, А.Н. Турапин // *Neftegaz.RU*. 2019. № 12 (96). С. 64–67.

8. Фетисов, В.С. Проблемы измерений толщины асфальто-смолопарафиновых отложений в нефтепроводах и пути их решения / В.С. Фетисов, К.А. Табет-Наиф // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2018. № 1. С. 55–60.

9. ГОСТ Р 52727-2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования: национальный стандарт Российской Федерации: [дата введения 01.10.2007]. М.: Стандартинформ, 2008. 16 с.

10. Rose, J.L. *Ultrasonic Guided Waves in Solid Media* / J.L. Rose. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 512 p.

11. Викторов, И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике / И.А. Викторов. М.: Наука, 1966. 168 с.

12. Капранов, Б.И. Акустические методы контроля и диагностики. Часть 1: учебное пособие / Б.И. Капранов, М.М. Коротков. Томск: Изд-во Томский политехнический университет, 2008. 186 с.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**XI Всероссийская конференция по акустической эмиссии
с международным участием**

Москва, 20–23 апреля 2026 г.

СБОРНИК ТРУДОВ

Редакционный совет: **Дамаскинская Е.Е., Попов А.В., Елизаров С.В.,
Шелобков В.И., Петерсен Т.Б., Харебов В.Г., Харебов К.В.**

Инженер по компьютерному макетированию *Ю.А. Петропольская*
Художественное оформление *А.В. Гавердовский*

ISBN 978-5-4442-0213-5



Сдано в набор 15.03.2026. Подписано в печать 10.04.2026
Формат 60×90 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Гарнитура Times
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 12,35. Тираж 77 экз. Заказ

ООО «Издательский дом «СПЕКТР»
119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1. Тел.: (495) 514 76 50
<http://www.idspektr.ru>. E-mail: info@idspektr.ru

Отпечатано в типографии «Белый Ветер»
115054, Москва, ул. Щипок, 28