



Организация
Объединенных Наций по
вопросам образования,
науки и культуры



Международный
центр компетенций
в горнотехническом образовании
под эгидой ЮНЕСКО

**Международная специальная краткосрочная программа
Международного центра компетенций в горнотехническом
образовании под эгидой ЮНЕСКО**

**РАЗРАБОТАНА В РАМКАХ СОДЕЙСТВИЯ ЭКСПОРТА
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСЛУГ**

**«ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКА РЕСУРСА
ОПАСНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ
МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ»**

Уровень программы: общий

Форма обучения: очная

Объем программы: 36 часов

**Руководитель
программы:**

д.т.н., Носов В.В.

**Составитель
программы:**

д.т.н., Носов В.В.



ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

1. Общие положения

1.1. Цель программы

Цель программы – освоение знаний о явлении и методе акустической эмиссии (АЭ), об объектах, требующих проведения АЭ-контроля, основных принципах создания, работы и использования аппаратуры и технологий АЭ-контроля, получения и обработки акустико-эмиссии, методиках акустико-эмиссионного контроля, диагностики состояния и оценки ресурса природной среды, материалов, веществ, изделий, технических объектов, овладение навыками организации и проведения АЭ контроля, обработки регистрируемой АЭ информации; оформления документации по результатам АЭ контроля;

1.2. Основные задачи программы

Получение дополнительных знаний, умений и навыков для реализации возможности:

- решать типовые задачи профессиональной деятельности на основе информационно-библиографической культуры с использованием информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности;
- ссылаться на свои наблюдения в условиях производственных испытаний, определять места и составлять схемы расположения преобразователей АЭ на объекте контроля;
- осуществлять акустико-эмиссионный контроль на разных типах объектов и этапах эксплуатации;
- производить оценку ресурса по результатам акустико-эмиссионного контроля;
- составлять протоколы, заключения отчёты, по результатам акустико-эмиссионного контроля.

1.3. Категория слушателей

Студенты и аспиранты, обучающиеся по направлениям подготовки, связанным с производственными технологиями в области обеспечения качества и безопасной эксплуатации объектов химической, атомной, нефтехимической, нефте-, газо-, горнодобывающей, металлургической и транспортной промышленности, топливно-энергетического комплекса.

1.4. Планируемые результаты обучения

Результаты освоения Программы определяются сформированными у выпускника компетенциями, т.е. его способностью применять знания, умения, опыт и личностные качества в соответствии с задачами профессиональной деятельности. Дополнительные профессиональные компетенции сформированы на основе профессиональных стандартов, соответствующих профессиональной деятельности выпускников, а также на основе анализа требований к профессиональным компетенциям, предъявляемым к выпускникам на рынке труда, обобщения отечественного и зарубежного опыта.

№ п/п	Формируемые профессиональные компетенции	Основные показатели освоения модуля
1.	Способность управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла	Знать этапы жизненного цикла проекта; этапы разработки и реализации проекта; методы разработки и управления проектами Уметь разрабатывать проект с учетом анализа альтернативных вариантов его реализации, определять целевые этапы, основные направления работ; объяснить цели и сформулировать задачи, связанные с подготовкой и реализацией проекта; управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла Владеть навыками применения методик

№ п/п	Формируемые профессиональные компетенции	Основные показатели освоения модуля
		разработки и управления проектом; методами оценки потребности в ресурсах и эффективности проекта
2.	Способность решать производственные и (или) исследовательские задачи на основе фундаментальных знаний в области диагностики состояния и обеспечения безопасной эксплуатации опасных технических объектов	<p>Знать содержание естественнонаучных дисциплин, составляющих теоретическую основу модулей профильной подготовки</p> <p>Уметь решать профессиональные задачи в области металлургии и химической технологии, используя фундаментальные знания, применять фундаментальные знания для решения задач в междисциплинарных областях профессиональной деятельности</p> <p>Владеть навыком решения исследовательских и производственных задач, относящихся к области металлургии и металлообработки с применением фундаментальных знаний</p>
3.	Способность оценивать результаты научно-технических разработок, научных исследований и обосновывать собственный выбор, систематизируя и обобщая достижения в отрасли неразрушающего контроля и диагностики	<p>Знать отечественный и международный опыт в области обеспечения безопасной эксплуатации посредством диагностирования объектов химической, атомной, нефтехимической, нефте-, газо-, горнодобывающей, металлургической и транспортной промышленности, топливно-энергетического комплекса.</p> <p>Уметь собирать, обрабатывать, анализировать и обобщать результаты экспериментов и исследований в области обеспечения безопасной эксплуатации посредством диагностирования материалов, веществ и изделий, объектов химической, атомной, нефтехимической, нефте-, газо-, горнодобывающей, металлургической и транспортной промышленности, топливно-энергетического комплекса.</p> <p>Владеть правилами анализа технической информации диагностикой объектов в области обеспечения безопасной эксплуатации посредством диагностирования объектов химической, атомной, нефтехимической, нефте-, газо-, горнодобывающей, металлургической и транспортной промышленности, топливно-энергетического комплекса на основе анализа научно-технической информации о технологических процессах</p>

№ п/п	Формируемые профессиональные компетенции	Основные показатели освоения модуля
4.	Способность анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия	<p>Знать закономерности и особенности социально-исторического развития различных культур; особенности межкультурного разнообразия общества; правила и технологии эффективного межкультурного взаимодействия</p> <p>Уметь понимать и толерантно воспринимать межкультурное разнообразие общества; анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия</p> <p>Владеть методами и навыками эффективного межкультурного взаимодействия</p>
5.	Способность организовать контроль образцов сырья, материалов, полуфабрикатов и готовой продукции на производстве	<p>Знать методики контроля технологических свойств материалов. Методы анализа и контроля и управления качеством продукции в области обеспечения безопасной эксплуатации посредством диагностирования объектов химической, атомной, нефтехимической, нефте-, газо-, горнодобывающей, металлургической и транспортной промышленности, топливно-энергетического комплекса. Управление качеством продукции металлургического производства</p> <p>Уметь применять статистические и физические методы обработки результатов акустико-эмиссионного контроля</p> <p>Владеть анализом качества методического и программного обеспечения диагностических систем, работоспособности технологического и диагностического оборудования.</p>

1.5. Требования к результатам освоения программы

С целью достижения указанных в п. 1.4 дополнительных профессиональных компетенций, слушатели в процессе освоения Краткосрочной программы должны получить знания по вопросам основ функционирования и общих тенденций развития и модернизации существующих объектов в области обеспечения безопасной эксплуатации посредством диагностирования объектов химической, атомной, нефтехимической, нефте-, газо-, горнодобывающей, металлургической и транспортной промышленности, топливно-энергетического комплекса.; развить умения организовывать и проводить теоретические и экспериментальные исследования, связанные с определением информативных параметров технологических процессов применительно к различным объектам в области обеспечения безопасной эксплуатации посредством диагностирования объектов химической, атомной, нефтехимической, нефте-, газо-, горнодобывающей, металлургической и транспортной промышленности, топливно-энергетического комплекса.; приобрести навыки проведения теоретических и экспериментальных исследований, связанных с определением акустико-эмиссионных параметров технологических процессов применительно к различным объек-

там химической, атомной, нефтехимической, нефте-, газо-, горнодобывающей, металлургической и транспортной промышленности, топливно-энергетического комплекса.

1.6. Календарный учебный график

Условные обозначения:

Теоретическое обучение	час
Итоговая аттестация	ИА

Форма обучения	Дни /ауд.час														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
очная	2	4	4	4	4	-	-	4	2	-	-	4	-	-	-

1.7. Учебный план

№	Наименование дисциплин (модуля)	Всего часов	В том числе				
			Лекции	Практические занятия (семинары)	Самостоятельная работа	Выездные мастер-классы	Итоговая аттестация
1	Модуль 1. Введение. Объекты и технологии АЭ контроля и диагностики. Теоретические основы метода АЭ	4	2	-	2	-	-
2	Модуль 2. Аппаратура и методическое обеспечение метода АЭ.	8	2	4	2	-	-
3	Модуль 3. Организация работ при проведении АЭ- контроля.	8	2	4	2	-	-
4	Модуль 4. Основные системы классификации источников и технологии АЭ-контроля.	6	4	-	2	-	-
5	Модуль 5. Оценка работоспособности и ресурса объектов на основе результатов АЭ- контроля	6	4	-	2	-	-
6	Проведение аттестационных мероприятий	4	-	-	-	-	4
	Всего	36	14	8	10	-	4

1.8. Объем программы и виды учебной работы

Вид учебной работы	Часы
Лекционные занятия	14
Практические и лабораторные занятия	8
Выездные мастер-классы	-
Итоговая аттестация	4
Всего очных занятий	26
Самостоятельная работа, включая подготовку к итоговой аттестации	10
Общий объем программы	36

2. Содержание обучения

2.1. Содержание образовательных модулей

№ п/п	Наименование профессионального модуля	Содержание учебного материала	Объем часов
1.	Модуль 1. Введение. Объекты и технологии АЭ контроля и диагностики. Теоретические основы метода АЭ	Общие положения. Назначение и область применения метода акустической эмиссии. Объекты и проблемы АЭ контроля и диагностики. Физические основы явления АЭ. Модели источников и основные параметры АЭ. Два подхода к интерпретации результатов регистрации сигналов АЭ, механические и микромеханические модели. Информационно-кинетический подход к АЭ диагностированию.	4
2.	Модуль 2. Аппаратура и методическое обеспечение метода АЭ.	Преобразование сигналов АЭ, преобразователи АЭ, акустико-эмиссионная аппаратура, основные параметры АЭ.	8
3.	Модуль 3. Организация работ при проведении АЭ- контроля.	Правила проведения АЭ контроля по ПБ 03-593-03. Установка преобразователей акустической эмиссии. Проверка работоспособности акустико-эмиссионной аппаратуры и калибровка каналов. Нагружение объекта. Анализ шумов. Определение местоположения источников акустической эмиссии	8
4.	Модуль 4. Основные системы классификации источников и технологии АЭ-контроля.	Информативные диагностические АЭ-показатели состояния технических объектов. Классификация, принципы подбора, оценки и корректировки, связь с прочностными характеристиками объекта контроля. Оформление результатов контроля.	6
5.	Модуль 5. Оценка работоспособности и ресурса объектов на основе результатов АЭ- контроля.	Технологии контроля состояния и методики оценки работоспособности и ресурса объектов контроля, методические и метрологические аспекты оценки, перспективы развития технологий и методик.	6
6.	Проведение аттестационных мероприятий	Тестовые, письменные и устные задания	4
Всего			36

2.2 Рабочие программы дисциплин (модулей) – представлены в Приложении 1.

2.3. Формы аттестаций по программе

Для оценки качества усвоения знаний, умений и опыта деятельности предусмотрены текущий и итоговый виды контроля.

Текущий контроль успеваемости осуществляется на основе письменных работ, которые содержат контрольные вопросы по каждому изучаемому модулю и должны быть сданы обучающимися в ходе учебного периода.

Форма итоговой аттестации по программе – **зачет**.

К зачету допускаются только те слушатели, которые успешно сдали все задания и отчёты по лабораторным работам по изученным модулям.

Зачет подают в простой письменной форме по билетам. Структура всех билетов одинакова и содержит два теоретических вопроса и практическое задание.

При подготовке ответа на каждый вопрос следует придерживаться структуры соответствующей темы, предложенной в разделе «Содержание разделов учебной дисциплины (модуля)» Рабочей программы.

При подготовке к зачету целесообразно составить план (схему) ответа на каждый вопрос и зафиксировать его на каком-либо носителе. По отдельным этапам такого плана полезно записать основные тезисы. Не следует стараться выучить весь материал наизусть. Важно понять материал, чему будет способствовать концентрация мыслей на ключевых определениях и понятиях.

2.4. Оценочные материалы (фонд оценочных средств)

Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету

Тематика для самостоятельной подготовки

Модуль 1. Введение

1. Общие положения. Назначение и область применения метода акустической эмиссии.

2. Объекты АЭ контроля.

3. Общие проблемы АЭ контроля и диагностики.

4. Подходы к решению проблем АЭ контроля и диагностики.

5. Перспективы и задачи развития метода АЭ.

Теоретические основы метода АЭ

1. Физические основы явления АЭ.

2. Модели источников и основные параметры АЭ.

3. Два физических подхода к интерпретации результатов регистрации сигналов АЭ, механические и микромеханические модели параметров АЭ.

4. Информационно-кинетический подход к АЭ диагностированию.

5. Информативные параметры акустической эмиссии.

Модуль 2. Аппаратура и методическое обеспечение метода АЭ.

1. Источники сигналов АЭ.

2. Первичные преобразователи АЭ.

3. Акустико-эмиссионная аппаратура.

4. Основные параметры АЭ, информативность параметров.

5. Методология совершенствования метода АЭ.

Модуль 3. Организация работ при проведении АЭ- контроля.

1. Правила проведения АЭ контроля по ПБ 03-593-03.

2. Установка преобразователей акустической эмиссии.

3. Проверка работоспособности акустико-эмиссионной аппаратуры, калибровка каналов.

4. Нагружение объекта. Анализ шумов.

5. Определение местоположения источника.

Модуль 4. Основные системы классификации источников и технологии АЭ-контроля.

1. Информативные диагностические АЭ- показатели состояния технических объектов.
2. Классификация источников АЭ по ПБ 03-593-03.
3. Принципы подбора, оценки и корректировки технологий.
4. Связь с прочностными характеристиками объекта контроля.
5. Оформление результатов контроля.

Модуль 5. Оценка работоспособности и ресурса объектов на основе результатов АЭ- контроля

1. АЭ-диагностика сосудов, работающих под давлением. Испытания изделий из композиционных материалов и органопластиковых корпусов.
2. АЭ оценка состояния магистральных трубопроводов
3. АЭ-диагностика металлоконструкций грузоподъемных машин АЭ-диагностика шарнира противовеса подъемного механизма Дворцового моста через реку Неву.
4. АЭ контроль продукции в процессе производства.
5. Оценка удароопасности участка массива горных пород на основе микромеханической модели акустической эмиссии, зафиксированной после технологического взрыва.

2.5. Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации (дифференцированного зачета)

2.5.1. Примерный перечень вопросов/заданий для подготовки к дифференцированному зачету:

Задания:

1. Определить наиболее активный источник АЭ.
2. Определить наиболее опасный источник АЭ.
3. Найти корреляцию активности источников АЭ с разрушающей нагрузкой образцов, напряжениями, уровнем пояса абсорбера.
4. Сравнить показатели активности и опасности источников АЭ по информативности.

Примерный перечень вопросов к дифференцированному зачёту:

1. Структура автоматизированных систем АЭ контроля включает ...
2. Акустическая эмиссия – это...
3. Акустико-эмиссионный метод диагностирования основан на...
4. Надёжностью называется...
5. Какое из перечисленных понятий не относится к свойству надёжности
6. Безотказность-это свойство изделия...
7. Вероятностью безотказной работы характеризует...
8. Долговечность - свойство изделия...
9. Ресурсом технического объекта называется...
10. Перечислите основные параметры акустической эмиссии...
11. Чем оптимизируется рациональный поиск оптимального варианта решения задач диагностики?
12. Опишите микромеханическую модель временных зависимостей параметров АЭ...
13. Какая система диагностирования опирается на метод акустической эмиссии?
14. Какие факторы повышают амплитуду сигналов АЭ?
15. Какие факторы понижают амплитуду сигналов АЭ?
16. Какие стадии имеет процесс разрушения?
17. Что связывает между собой формула Данегана $N = A_d K^m$?
18. Основная цель акустико-эмиссионного контроля трубопроводов согласно СТО Газпром 2-2.3-328-2009 состоит в том, чтобы...

19. При проведении акустико-эмиссионного контроля во время пневмоиспытаний, согласно СТО Газпром 2-2.3-328-2009, нагружение производится путем ...
20. Основным источником информации о характеристиках усталостной прочности (долговечности) газопроводов, согласно СТО Газпром 2-3.5-252-2008, являются...
21. Сосуд считается выдержавшим гидравлическое испытание, если в процессе его проведения не обнаружено ...
22. Когда впервые была использована кинетическая концепция прочности в области АЭ?
23. Благодаря каким свойствам происходит распространение акустической волны в материале?

2.4.1 Критерии оценивания

Критерии оценок промежуточной аттестации

Оценка	Описание
Зачтено	Посещение более 50 % лекционных и лабораторных занятий; обучающийся твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос; все предусмотренные программой обучения задания выполнены, качество их выполнения достаточно высокое; в течение курса выполнил работу.
Не зачтено	Посещение менее 50 % лекционных и лабораторных занятий; обучающийся не знает значительной части материала, допускает существенные ошибки в ответах на вопросы; большинство предусмотренных программой обучения заданий не выполнено, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к минимальному.

Критерии оценок итоговой аттестации: примерная шкала оценивания знаний по выполнению заданий зачета:

Оценка	
Не зачтено	Зачтено
Посещение менее 50 % лекционных и практических занятий	Посещение не менее 50 % лекционных и практических занятий
Обучающийся не знает значительной части материала, допускает существенные ошибки в ответах на вопросы	Обучающийся хорошо знает материал, грамотно и по существу излагает его, допуская некоторые неточности в ответе на вопрос.
Не умеет находить решения большинства предусмотренных программой обучения заданий	Уверенно находит решения предусмотренных программой обучения заданий
Большинство предусмотренных программой обучения заданий не выполнено	Предусмотренные программой обучения задания успешно выполнены

2.5. Учебно-методические материалы (в том числе конспекты лекций)

представлены в **Приложении 2**.

2.6. Вид документа, подтверждающий прохождение обучения

После успешного окончания обучения выдается сертификат о прохождении Международной специальной краткосрочной программы под эгидой Международного центра ЮНЕСКО: «Диагностика состояния и оценка ресурса опасных технических объектов на основе метода акустической эмиссии».

3. Организационно-педагогические условия реализации программы:

3.1. Материально-технические условия реализации программы

Для реализации программы при проведении занятий лекционного типа и практических занятий используются специализированные аудитории, оснащенные мультимедийными проекторами и комплектом аппаратуры, позволяющей демонстрировать текстовые и графические материалы. Лабораторные помещения оснащены специальным оборудованием, лабораторными установками, аналитическим оборудованием. Помещение для самостоятельной работы, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации: 15 посадочных мест, доступ к сети «Интернет», в электронную информационно-образовательную среду Университета.

3.2. Кадровое обеспечение образовательного процесса по программе

№	Фамилия, Имя, Отчество	Образование (вуз; год окончания; специальность)	Должность, ученая степень, звание, стаж работы в данной или аналогичной области, лет	Количество научных и учебно-методических публикаций
Руководитель программы				
1	Носов Виктор Владимирович	Высшее, Ленинградский политехнический институт, 1982 г., механик	зав. кафедрой приборостроения, доктор технических наук, профессор, стаж работы более 20 лет	Автор более 280 научных работ
Профессорско-преподавательский состав программы				
2	Нефедьев Евгений Юрьевич	Высшее, Санкт-петербургский государственный университет. 1980 г., физик	Ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических, стаж работы более 30 лет	Автор более 100 научных работ
3	Махмудов Хайрулло Файзуллаевич	Высшее, Хаджинский государственный университет. 1988 г., физик	Старший научный сотрудник лаборатории физики прочности ФТИ им. А.Ф.Иоффе, кандидат физико-математических, стаж работы более 20 лет	Автор более 100 научных работ.

Приложение 1
к образовательной программе –
«Международная специальная краткосрочная
Программа под эгидой Международного центра ЮНЕСКО
«Диагностика состояния и оценка ресурса опасных технических
объектов на основе метода акустической эмиссии»

Рабочая программа модуля

«Введение. Объекты и технологии АЭ контроля и диагностики.
Теоретические основы метода АЭ»

1. Содержание модуля

Модуль содержит общие положения и материал и кратко освящает материал по темам: "Назначение и область применения метода акустической эмиссии", "Объекты и проблемы АЭ контроля и диагностики", "Физические основы явления АЭ", Модели источников и основные параметры АЭ", информацию о двух подходах к интерпретации результатов регистрации сигналов АЭ, разобраны механические и микромеханические модели. Приводятся примеры информационно-кинетического подхода к АЭ диагностированию.

2. Матрица формирования профессиональных компетенций

Процесс изучения модуля «Введение. Объекты и технологии АЭ контроля и диагностики. Теоретические основы метода АЭ» направлен на формирование следующих компетенций:

№ п/п	Формируемые профессиональные компетенции	Кол-во часов	Основные показатели освоения модуля
1	Способность управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла	2	<p>Знать этапы жизненного цикла проекта; этапы разработки и реализации проекта; методы разработки и управления проектами</p> <p>Уметь разрабатывать проект с учетом анализа альтернативных вариантов его реализации, определять целевые этапы, основные направления работ; объяснить цели и сформулировать задачи, связанные с подготовкой и реализацией проекта; управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла</p> <p>Владеть навыками применения методик разработки и управления проектом; методами оценки потребности в ресурсах и эффективности проекта</p>

3. Структура и содержание модуля

№ п/п	Наименование модуля	Всего, час	в том числе			Форма контроля
			ЛК	ПР	СР	
1	Введение. Общие положения разработки систем управления технологическими процессами.	2	2	–	–	–

4. Перечень занятий семинарского типа

Занятия семинарского типа в данном модуле не предусмотрены.

5. Учебно-методическое обеспечение

1. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования: Учебное пособие 2016, 2-е изд. Испр и доп, «Лань», СПб, - 376 с. <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/diagnostika-mashin-i-oborudovaniya-72902234/>
2. Носов В.В. Механика композиционных материалов. Лабораторные работы и практические занятия: Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2013, 2-е изд. перераб. и доп., 240 с.: ил. <https://lanbook.com/catalog/inzhenerno-tekhnicheskie-nauki/mehanika-kompozicionnyh-materialov-laboratornye-raboty-i-prakticheskie-zanyatiya-60945806/>
3. Носов В.В., Матвиев И.В. Механика неоднородных материалов. Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2017, 2-е изд. испр. и доп., 276 с <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/mehanika-neodnorodnyh-materialov-72893571/>
4. Носов В.В, Ямилова А.Р. Метод акустической эмиссии. Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2017, 304 с. <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/metod-akusticheskoy-emissii-72893573///>
5. Носов В.В. Принципы оптимизации технологий акустико-эмиссионного контроля прочности промышленных объектов // Дефектоскопия, № 7, 2016, с. 52-67
6. Физические основы акустического контроля: Учебно- методический комплекс / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: А.И. Потапов, В.В. Носов. СПб, 2016. 151 с. <http://old.spmi.ru/system/files/lib/uch/metodichki/2016-205.pdf>

Рабочая программа модуля

«Аппаратура и методическое обеспечение метода АЭ»

1. Содержание модуля

В модуле содержится материал, освещающий такие темы, как: "Преобразование сигналов АЭ", "Преобразователи АЭ", "Акустико-эмиссионная аппаратура", "Основные параметры АЭ".

2. Матрица формирования профессиональных компетенций

Процесс изучения модуля «Аппаратура и методическое обеспечение метода АЭ» направлен на формирование следующих компетенций:

№ п/п	Формируемые профессиональные компетенции	Кол-во часов	Основные показатели освоения модуля
1	Способность решать производственные и (или) исследовательские задачи на основе фундаментальных знаний в области диагностики состояния и обеспечения безопасной эксплуатации опасных технических объектов	8	<p>Знать содержание естественнонаучных дисциплин, составляющих теоретическую основу модулей профильной подготовки</p> <p>Уметь решать профессиональные задачи в области металлургии и химической технологии, используя фундаментальные знания, применять фундаментальные знания для решения задач в междисциплинарных областях профессиональной деятельности</p> <p>Владеть навыком решения исследовательских и производственных задач, относящихся к области металлургии и металлообработки с применением фундаментальных знаний</p>

3. Структура модуля

№ п/п	Наименование модуля	Всего, час	в том числе			Форма контроля
			ЛК	ПР	СР	
1.1	Аппаратура и методическое обеспечение метода АЭ.	4	2	-	2	-
1.2.	Акустико-эмиссионный контроль прочности сварных соединений	4	-	4	-	-

4. Перечень занятий семинарского типа

№ п/п	Наименование занятия семинарского типа	Вид занятия	Кол-во час.
1.	Акустико-эмиссионный контроль прочности сварных соединений	практическое занятие	4

5. Учебно-методическое обеспечение

- Носов В.В. Диагностика машин и оборудования: Учебное пособие 2016, 2-е изд. Испр и доп, «Лань», СПб, - 376 с. <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/diagnostika-mashin-i-oborudovaniya-72902234/> //
- Носов В.В. Механика композиционных материалов. Лабораторные работы и практические занятия: Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2013, 2-е изд. перераб. и доп., 240 с.: ил. <https://lanbook.com/catalog/inzhenerno-tekhnicheskie-nauki/mehanika-kompozitsionnyh-materialov-laboratornye-raboty-i-prakticheskie-zanyatiya-60945806/>

3. Носов В.В., Матвиев И.В. Механика неоднородных материалов. Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2017, 2-е изд. испр. и доп., 276 с <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/mehanika-neodnorodnyh-materialov-72893571/>
4. Носов В.В., Ямилова А.Р. Метод акустической эмиссии. Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2017, 304 с. <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/metod-akusticheskoy-emissii-72893573///>
5. Носов В.В. Принципы оптимизации технологий акустико-эмиссионного контроля прочности промышленных объектов // Дефектоскопия, № 7, 2016, с. 52-67
6. Физические основы акустического контроля: Учебно-методический комплекс / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: А.И. Потапов, В.В. Носов. СПб, 2016. 151 с. <http://old.spmi.ru/system/files/lib/uch/metodichki/2016-205.pdf>
7. Физические основы акустического контроля: Учебно-методический комплекс / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: А.И. Потапов, В.В. Носов. СПб, 2016. 151 с. <http://old.spmi.ru/system/files/lib/uch/metodichki/2016-205.pdf>
8. Объекты и технологии акустико-эмиссионного контроля и диагностики: Учебно-методический комплекс/, Санкт-Петербургский горный университет, Сост. В.В.Носов СПб, 2018, 148 с. http://irbis.spmi.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=374&task=set_static_req&bns_string=NWPIB,ELC,ZAPIS&req_irb=<>I=6%D0%9F5%2E2%2F%D0%9E%2D29%2D069024892<>
9. Носов В. В., Матвиев И. В., Ямилова А. В., Зеленский Н. А., Оценка состояния технических объектов на основе моделирования прочностной неоднородности материала / Моделирование, оптимизация и информационные технологии, № 3, Т 21, 2016. С 1 - 20. <https://moit.vivt.ru/?cat=2357&lang=ru>
10. Способ оценки прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата: Пат. 2617195 РФ, МПК(51) G01N 29/14 (2006.01)/ - Оpubл. 21.04.2017. Бюл. № 12 <http://www.findpatent.ru/patent/261/2617195.html>
11. Носов В.В., Самигуллин Г.Х., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А. Микромеханическая модель акустической эмиссии как методологическая основа прогнозирования разрушения сварных соединений// Нефтегазовое дело, 2016, т.14, № 1, С. 244-253 <http://ngdelo.ru/files/ngdelo/2016/1/ngdelo-1-2016-p244-253.pdf>
12. Носов В.В., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А., Матвиев И.В. Оптимизация акустико-эмиссионного контроля прочности сварных соединений// Вестник МЭИ, 2017, № 2. С. 96-101. <http://vestnik.mpei.ru/vestnik/archive/article/472/>

6. Материально-техническое оснащение аудиторий:

Специализированные аудитории, используемые при проведении занятий лекционного типа оснащены мультимедийными проекторами и комплектом аппаратуры, позволяющей демонстрировать текстовые и графические материалы.

Рабочая программа модуля

«Организация работ при проведении АЭ- контроля»

1. Содержание модуля

В модуле подробно разобраны правила проведения АЭ контроля по ПБ 03-593-03. Представлена информация об установке преобразователей акустической эмиссии. Представлен порядок проверки работоспособности акустико-эмиссионной аппаратуры и калибровка каналов, подробно описана процедура анализа шумов. Представлена методология определения местоположения источников акустической эмиссии.

2. Матрица формирования профессиональных компетенций

Процесс изучения модуля «Организация работ при проведении АЭ- контроля» направлен на формирование следующих компетенций:

№ п/п	Формируемые профессиональные компетенции	Кол-во часов	Основные показатели освоения модуля
1	Способность оценивать результаты научно-технических разработок, научных исследований и обосновывать собственный выбор, систематизируя и обобщая достижения в отрасли неразрушающего контроля и диагностики	8	<p>Знать отечественный и международный опыт в области обеспечения безопасной эксплуатации посредством диагностирования объектов химической, атомной, нефтехимической, нефте-, газо-, горнодобывающей, металлургической и транспортной промышленности, топливно-энергетического комплекса.</p> <p>Уметь собирать, обрабатывать, анализировать и обобщать результаты экспериментов и исследований в области обеспечения безопасной эксплуатации посредством диагностирования материалов, веществ и изделий, объектов химической, атомной, нефтехимической, нефте-, газо-, горнодобывающей, металлургической и транспортной промышленности, топливно-энергетического комплекса.</p> <p>Владеть правилами анализа технической информации диагностикой объектов в области обеспечения безопасной эксплуатации посредством диагностирования объектов химической, атомной, нефтехимической, нефте-, газо-, горнодобывающей, металлургической и транспортной промышленности, топливно-энергетического комплекса на основе анализа научно-технической информации о технологических процессах</p>

3. Структура модуля

№ п/п	Наименование модуля	Всего, час	в том числе			Форма контроля
			ЛК	ПР	СР	
1.1	Организация работ при проведении АЭ- контроля.	4	2	–	2	–
1.2	Методология обеспечения информативности акустико-эмиссионного неразрушающего контроля прочности конструкционных материалов	4	–	4	–	–

4. Перечень занятий семинарского типа

№ п/п	Наименование занятия семинарского типа	Вид занятия	Кол-во час.
1.	Методология обеспечения информативности акустико-эмиссионного неразрушающего контроля прочности конструкционных материалов	практическое занятие	4

5. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

5.1. Основная литература

1. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования: Учебное пособие 2016, 2-е изд. Испр и доп, «Лань», СПб, - 376 с. <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/diagnostika-mashin-i-oborudovaniya-72902234/>
2. Носов В.В. Механика композиционных материалов. Лабораторные работы и практические занятия: Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2013, 2-е изд. перераб. и доп., 240 с.: ил. <https://lanbook.com/catalog/inzhenerno-tehnicheskie-nauki/mehanika-kompozicionnyh-materialov-laboratornye-raboty-i-prakticheskie-zanyatiya-60945806/>
3. Носов В.В., Матвьян И.В. Механика неоднородных материалов. Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2017, 2-е изд. испр. и доп., 276 с <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/mehanika-neodnorodnyh-materialov-72893571/>
4. Носов В.В, Ямилова А.Р. Метод акустической эмиссии. Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2017, 304 с. <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/metod-akusticheskoy-emissii-72893573///>
5. Носов В.В. Принципы оптимизации технологий акустико-эмиссионного контроля прочности промышленных объектов // Дефектоскопия, № 7, 2016, с. 52-67

5.2. Дополнительная литература

1. Физические основы акустического контроля: Учебно- методический комплекс / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: А.И. Потапов, В.В. Носов. СПб, 2016. 151 с. <http://old.spmi.ru/system/files/lib/uch/metodichki/2016-205.pdf>
2. Объекты и технологии акустико-эмиссионного контроля и диагностики: Учебно-методический комплекс/, Санкт-Петербургский горный университет, Сост. В.В.Носов СПб, 2018, 148 с. http://irbis.spmi.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=374&task=set_static_req&bnstring=NWPB,ELC,ZAPIS&req_irb=<.>I=6%D0%9F5%2E2%2F%D0%9E%2D29%2D069024892<.>
3. Носов В. В., Матвьян И. В., Ямилова А. В., Зеленский Н. А., Оценка состояния технических объектов на основе моделирования прочностной неоднородности материала / Моделирование, оптимизация и информационные технологии, № 3, Т 21, 2016. С 1 - 20. <https://moit.vivt.ru/?cat=2357&lang=ru>
4. Способ оценки прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата: Пат. 2617195 РФ, МПК(51) G01N 29/14 (2006.01)/ - Оpubл. 21.04.2017. Бюл. № 12 <http://www.findpatent.ru/patent/261/2617195.html>
5. Носов В.В., Самигуллин Г.Х., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А. Микромеханическая модель акустической эмиссии как методологическая основа прогнозирования разрушения сварных соединений// Нефтегазовое дело, 2016, т.14, № 1, С. 244-253 <http://ngdelo.ru/files/ngdelo/2016/1/ngdelo-1-2016-p244-253.pdf>

6. Носов В.В., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А., Матвиев И.В. Оптимизация акустико-эмиссионного контроля прочности сварных соединений// Вестник МЭИ, 2017, № 2. С. 96-101. <http://vestnik.mpei.ru/vestnik/archive/article/472/>
7. Носов В.В., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А., Матвиев И.В. Методика неразрушающего акустико-эмиссионного контроля прочности сварных соединений// Вестник МЭИ, 2017, № 3. С. 92-101 <http://vestnik.mpei.ru/vestnik/archive/article/487/>
8. Носов В.В., Номинас С.В., Зеленский Н.А. Оценка прочности сосудов давления на основе использования явления акустической эмиссии// Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2(219)' 2015. С. 182-190/
https://engtech.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2015/2/20_nosov.pdf
9. Носов В.В. Оценка удароопасности участка массива горных пород по результатам регистрации его сейсмоакустической активности// Записки Горного Института. 2015 г, Том 216, с. 62-75. <http://pmi-old.spmi.ru/sites/default/files/pdfarticle/62-75.pdf>
10. Носов В.В. Контроль прочности неоднородных материалов методом акустической эмиссии// Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 469-479 <https://cyberleninka.ru/article/v/kontrol-prochnosti-neodnorodnyh-materialov-metodom-akusticheskoy-emissii>
11. Носов В.В., Махмудов Х.Ф. Связь акустической эмиссии упруго нагруженных заготовок и качества проката из них // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. 2016, т.21, № 3. С. 1195-1198. http://www.docme.ru/doc/1641137/svyaz._-akusticheskoy-emissii-uprugonagruzhennyh-zagotovok-i..
12. Носов В.В. Акустико-эмиссионная диагностика качества металлургического сляба на основе моделирования процесса разрушения и пластической перестройки структуры материала/ XXIII Петербургские чтения по проблемам прочности, посвященной 100-летию ФТИ им. А.Ф. Иоффе и 110-летию со дня рождения чл.-кор. АН СССР А.В. Степанова, Санкт-Петербург, Россия, 10-12 апреля 2018 г. Санкт-Петербург. [http://nanomat.spbu.ru/sites/default/files/Programma%20chteniy%20\(proekt\).pdf](http://nanomat.spbu.ru/sites/default/files/Programma%20chteniy%20(proekt).pdf)
13. ПБ 03-593-03 Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов и технологических трубопроводов. Основной документ, регламентирующий общие положения проведения АЭ контроля в промышленности. Распространяется практически на все виды оборудования. Утвержден Ростехнадзором и является основой всех отраслевых методических документов по АЭ-контролю. <https://mooml.com/d/normativnye-dokumenty-po-nadzoru-v-oblasti-stroitelstva/normativnye-dokumenty-po-gortekhnadzoru/14894/>
14. ГОСТ Р 55045-2012. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Термины, определения и обозначения. <http://docs.cntd.ru/document/1200096172>
15. Nosov V.V. Bump hazard evaluation of a rock mass area as a result of its seismic acoustic activity registration/ Journal of Mining Institute. 2015. Vol. 216. P. 62-76 (Оценка удароопасности участка массива горных пород по результатам регистрации его сейсмоакустической активности)
16. Nosov V.V. Control of inhomogeneous materials strength by method of acoustic emission /Journal of Mining Institute. 2017. Vol. 226. P. 469-479 (Контроль прочности неоднородных материалов методом акустической эмиссии)

5.3. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студента

1. Физические основы акустического контроля: Учебно- методический комплекс / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: А.И. Потапов, В.В. Носов. СПб, 2016. 151 с. <http://old.spmi.ru/system/files/lib/uch/metodichki/2016-205.pdf>
2. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования: Учебное пособие 2016, 2-е изд. Испр и доп, «Лань», СПб, - 376 с. <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/diagnostika-mashin-i-oborudovaniya-72902234/> //

3. Носов В.В. Механика композиционных материалов. Лабораторные работы и практические занятия: Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2013, 2-е изд. перераб. и доп., 240 с.: ил. <https://lanbook.com/catalog/inzhenerno-tehnicheskie-nauki/mehanika-kompozicionnyh-materialov-laboratornye-raboty-i-prakticheskie-zanyatiya-60945806/>

4. Носов В.В., Матвиан И.В. Механика неоднородных материалов. Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2017, 2-е изд. испр. и доп., 276 с <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/mehanika-neodnorodnyh-materialov-72893571/>

5. Носов В.В., Ямилова А.Р. Метод акустической эмиссии. Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2017, 304 с. <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/metod-akusticheskoy-emissii-72893573///>

6. Материально-техническое оснащение аудиторий:

Специализированные аудитории, используемые при проведении занятий лекционного типа оснащены мультимедийными проекторами и комплектом аппаратуры, позволяющей демонстрировать текстовые и графические материалы.

Рабочая программа модуля

«Основные системы классификации источников и технологии АЭ-контроля»

1. Содержание модуля

Модуль содержит информацию об информативных диагностических АЭ-показателях состояния технических объектов, приведена классификация, принципы подбора, оценки и корректировки, связь с прочностными характеристиками объекта контроля. Рассмотрены примеры оформления результатов контроля.

2. Матрица формирования профессиональных компетенций

Процесс изучения модуля «Основные системы классификации источников и технологии АЭ-контроля» направлен на формирование следующих компетенций:

№ п/п	Формируемые профессиональные компетенции	Кол-во часов	Основные показатели освоения модуля
1	Способность анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия	6	<p>Знать закономерности и особенности социально-исторического развития различных культур; особенности межкультурного разнообразия общества; правила и технологии эффективного межкультурного взаимодействия</p> <p>Уметь понимать и толерантно воспринимать межкультурное разнообразие общества; анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия</p> <p>Владеть методами и навыками эффективного межкультурного взаимодействия</p>

3. Структура и содержание модуля

№ п/п	Наименование модуля	Всего, час	в том числе			Форма контроля
			ЛК	ПР	СР	
1	Основные системы классификации источников и технологии АЭ-контроля.	6	4	-	2	-

4. Перечень занятий семинарского типа

Занятия семинарского типа в данном модуле не предусмотрены.

5. Учебно-методическое обеспечение

5.1. Основная литература

1. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования: Учебное пособие 2016, 2-е изд. Испр и доп, «Лань», СПб, - 376 с. <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/diagnostika-mashin-i-oborudovaniya-72902234/> //
2. Носов В.В. Механика композиционных материалов. Лабораторные работы и практические занятия: Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2013, 2-е изд. перераб. и доп., 240 с.: ил. <https://lanbook.com/catalog/inzhenerno-tekhnicheskie-nauki/mehanika-kompozicionnyh-materialov-laboratornye-raboty-i-prakticheskie-zanyatiya-60945806/>
3. Носов В.В., Матвиев И.В. Механика неоднородных материалов. Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2017, 2-е изд. испр. и доп., 276 с <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/mehanika-neodnorodnyh-materialov-72893571/>
4. Носов В.В., Ямилова А.Р. Метод акустической эмиссии. Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2017, 304 с. <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/metod-akusticheskoy-emissii-72893573///>
5. Носов В.В. Принципы оптимизации технологий акустико-эмиссионного контроля прочности промышленных объектов // Дефектоскопия, № 7, 2016, с. 52-67

5.2. Дополнительная литература

1. Физические основы акустического контроля: Учебно- методический комплекс / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: А.И. Потапов, В.В. Носов. СПб, 2016. 151 с. <http://old.spmi.ru/system/files/lib/uch/metodichki/2016-205.pdf>
2. Объекты и технологии акустико-эмиссионного контроля и диагностики: Учебно-методический комплекс/, Санкт-Петербургский горный университет, Сост. В.В.Носов СПб, 2018, 148 с. http://irbis.spmi.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=374&task=set_statistic_req&bns_string=NWPIB,ELC,ZAPIS&req_irb=<.>I=6%D0%9F5%2E2%2F%D0%9E%2D29%2D069024892<.>
3. Носов В. В., Матвиев И. В., Ямилова А. В., Зеленский Н. А., Оценка состояния технических объектов на основе моделирования прочностной неоднородности материала / Моделирование, оптимизация и информационные технологии, № 3, Т 21, 2016. С 1 - 20. <https://moit.vivt.ru/?cat=2357&lang=ru>
4. Способ оценки прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата: Пат. 2617195 РФ, МПК(51) G01N 29/14 (2006.01)/ - Опубл. 21.04.2017. Бюл. № 12 <http://www.findpatent.ru/patent/261/2617195.html>

5. Носов В.В., Самигуллин Г.Х., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А. Микромеханическая модель акустической эмиссии как методологическая основа прогнозирования разрушения сварных соединений// Нефтегазовое дело, 2016, т.14, № 1, С. 244-253 <http://ngdelo.ru/files/ngdelo/2016/1/ngdelo-1-2016-p244-253.pdf>
6. Носов В.В., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А., Матвиев И.В. Оптимизация акустико-эмиссионного контроля прочности сварных соединений// Вестник МЭИ, 2017, № 2. С. 96-101. <http://vestnik.mpei.ru/vestnik/archive/article/472/>
7. Носов В.В., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А., Матвиев И.В. Методика неразрушающего акустико-эмиссионного контроля прочности сварных соединений// Вестник МЭИ, 2017, № 3. С. 92-101 <http://vestnik.mpei.ru/vestnik/archive/article/487/>
8. Носов В.В., Номинас С.В., Зеленский Н.А. Оценка прочности сосудов давления на основе использования явления акустической эмиссии// Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2(219)' 2015. С. 182-190/
https://engtech.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2015/2/20_nosov.pdf
9. Носов В.В. Оценка удароопасности участка массива горных пород по результатам регистрации его сейсмоакустической активности// Записки Горного Института. 2015 г, Том 216, с. 62-75. <http://pmi-old.spmi.ru/sites/default/files/pdfarticle/62-75.pdf>
10. Носов В.В. Контроль прочности неоднородных материалов методом акустической эмиссии// Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 469-479 <https://cyberleninka.ru/article/v/kontrol-prochnosti-neodnorodnyh-materialov-metodom-akusticheskoy-emissii>
11. Носов В.В., Махмудов Х.Ф. Связь акустической эмиссии упруго нагруженных заготовок и качества проката из них // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки.2016, т.21, № 3. С. 1195-1198. http://www.docme.ru/doc/1641137/svyaz._-akusticheskoy-e-missii-uprugonagruzhennyh-zagotovok-i..
12. Носов В.В. Акустико-эмиссионная диагностика качества металлургического сырья на основе моделирования процесса разрушения и пластической перестройки структуры материала/ XXIII Петербургские чтения по проблемам прочности, посвященной 100-летию ФТИ им. А.Ф. Иоффе и 110-летию со дня рождения чл.-кор. АН СССР А.В. Степанова, Санкт-Петербург, Россия, 10-12 апреля 2018 г. Санкт-Петербург. [http://nanomat.spbu.ru/sites/default/files/Programma%20chteniy%20\(proekt\).pdf](http://nanomat.spbu.ru/sites/default/files/Programma%20chteniy%20(proekt).pdf)
13. ПБ 03-593-03 Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов и технологических трубопроводов. Основной документ, регламентирующий общие положения проведения АЭ контроля в промышленности. Распространяется практически на все виды оборудования. Утвержден Ростехнадзором и является основой всех отраслевых методических документов по АЭ-контролю. <https://mooml.com/d/normativnye-dokumenty-po-nadzoru-v-oblasti-stroitelstva/normativnye-dokumenty-po-gortekhnadzoru/14894/>
14. ГОСТ Р 55045-2012. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Термины, определения и обозначения. <http://docs.cntd.ru/document/1200096172>
15. Nosov V.V. Bump hazard evaluation of a rock mass area as a result of its seismic acoustic activity registration/ Journal of Mining Institute. 2015. Vol. 216. P. 62-76 (Оценка удароопасности участка массива горных пород по результатам регистрации его сейсмоакустической активности)

5.2. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студента

1. Физические основы акустического контроля: Учебно- методический комплекс / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: А.И. Потапов, В.В. Носов. СПб, 2016. 151 с. <http://old.spmi.ru/system/files/lib/uch/metodichki/2016-205.pdf>

2. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования: Учебное пособие 2016, 2-е изд. Испр и доп, «Лань», СПб, - 376 с. <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/diagnostika-mashin-i-oborudovaniya-72902234/> //
3. Носов В.В. Механика композиционных материалов. Лабораторные работы и практические занятия: Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2013, 2-е изд. перераб. и доп., 240 с.: ил. <https://lanbook.com/catalog/inzhenerno-tehnicheskie-nauki/mechanika-kompozicionnyh-materialov-laboratornye-raboty-i-prakticheskie-zanyatiya-60945806/>
4. Носов В.В., Матвиев И.В. Механика неоднородных материалов. Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2017, 2-е изд. испр. и доп. , 276 с <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/mechanika-neodnorodnyh-materialov-72893571/>
5. Носов В.В, Ямилова А.Р. Метод акустической эмиссии. Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2017, 304 с. <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/metod-akusticheskoy-emissii-72893573///>

6. Материально-техническое обеспечение:

Специализированные аудитории, используемые при проведении занятий лекционного типа оснащены мультимедийными проекторами и комплектом аппаратуры, позволяющей демонстрировать текстовые и графические материалы.

Рабочая программа модуля

«Оценка работоспособности и ресурса объектов на основе результатов АЭ- контроля»

1. Содержание модуля

В модуле содержится информация о технологии контроля состояния и методики оценки работоспособности и ресурса объектов контроля, представлены методические и метрологические аспекты оценки, перспективы развития технологий и методик.

2. Матрица формирования профессиональных компетенций

Процесс изучения модуля «Оценка работоспособности и ресурса объектов на основе результатов АЭ- контроля» направлен на формирование следующих компетенций:

№ п/п	Формируемые профессиональные компетенции	Кол-во часов	Основные показатели освоения модуля
1	Способность организовать контроль образцов сырья, материалов, полуфабрикатов и готовой продукции на производстве	6	Знать методики контроля технологических свойств материалов. Методы анализа и контроля и управления качеством продукции в области обеспечения безопасной эксплуатации посредством диагностирования объектов химической, атомной, нефтехимической, нефте-, газо-, горнодобывающей, металлургической и транспортной промышленности, топливно-энергетического комплекса. Управление качеством продукции металлургического производства

№ п/п	Формируемые профессиональные компетенции	Кол-во часов	Основные показатели освоения модуля
			<p>Уметь применять статистические и физические методы обработки результатов акустико-эмиссионного контроля</p> <p>Владеть анализом качества методического и программного обеспечения диагностических систем, работоспособности технологического и диагностического оборудования.</p>

3. Структура и содержание модуля

№ п/п	Наименование модуля	Всего, час	в том числе			Форма контроля
			ЛК	ЛБ	СР	
1	Оценка работоспособности и ресурса объектов на основе результатов АЭ- контроля	6	4	–	2	–

4. Перечень занятий семинарского типа

Занятия семинарского типа в данном модуле не предусмотрены.

5. Учебно-методическое обеспечение

5.3. Основная литература

- Носов В.В. Диагностика машин и оборудования: Учебное пособие 2016, 2-е изд. Испр и доп, «Лань», СПб, - 376 с. <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/diagnostika-mashin-i-oborudovaniya-72902234/> //
- Носов В.В. Механика композиционных материалов. Лабораторные работы и практические занятия: Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2013, 2-е изд. перераб. и доп., 240 с.: ил. <https://lanbook.com/catalog/inzhenerno-tehnicheskie-nauki/mehanika-kompozicionnyh-materialov-laboratornye-raboty-i-prakticheskie-zanyatiya-60945806/>
- Носов В.В., Матвьян И.В. Механика неоднородных материалов. Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2017, 2-е изд. испр. и доп. , 276 с <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/mehanika-neodnorodnyh-materialov-72893571/>
- Носов В.В, Ямилова А.Р. Метод акустической эмиссии. Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2017, 304 с. <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/metod-akusticheskoy-emissii-72893573///>
- Носов В.В. Принципы оптимизации технологий акустико-эмиссионного контроля прочности промышленных объектов // Дефектоскопия, № 7, 2016, с. 52-67

5.4. Дополнительная литература

- Физические основы акустического контроля: Учебно- методический комплекс / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: А.И. Потапов, В.В. Носов. СПб, 2016. 151 с. <http://old.spmi.ru/system/files/lib/uch/metodichki/2016-205.pdf>
- Объекты и технологии акустико-эмиссионного контроля и диагностики: Учебно-методический комплекс/, Санкт-Петербургский горный университет, Сост.

3. Носов В. В., Матвиев И. В., Ямилова А. В., Зеленский Н. А., Оценка состояния технических объектов на основе моделирования прочностной неоднородности материала / Моделирование, оптимизация и информационные технологии, № 3, Т 21, 2016. С 1 - 20. <https://moit.vivt.ru/?cat=2357&lang=ru>
4. Способ оценки прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата: Пат. 2617195 РФ, МПК(51) G01N 29/14 (2006.01)/ - Оpubл. 21.04.2017. Бюл. № 12 <http://www.findpatent.ru/patent/261/2617195.html>
5. Носов В.В., Самигуллин Г.Х., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А. Микромеханическая модель акустической эмиссии как методологическая основа прогнозирования разрушения сварных соединений// Нефтегазовое дело, 2016, т.14, № 1, С. 244-253 <http://ngdelo.ru/files/ngdelo/2016/1/ngdelo-1-2016-p244-253.pdf>
6. Носов В.В., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А., Матвиев И.В. Оптимизация акустико-эмиссионного контроля прочности сварных соединений// Вестник МЭИ, 2017, № 2. С. 96-101. <http://vestnik.mpei.ru/vestnik/archive/article/472/>
7. Носов В.В., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А., Матвиев И.В. Методика неразрушающего акустико-эмиссионного контроля прочности сварных соединений// Вестник МЭИ, 2017, № 3. С. 92-101 <http://vestnik.mpei.ru/vestnik/archive/article/487/>
8. Носов В.В., Номинас С.В., Зеленский Н.А. Оценка прочности сосудов давления на основе использования явления акустической эмиссии// Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2(219)' 2015. С. 182-190/
https://engtech.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2015/2/20_nosov.pdf
9. Носов В.В. Оценка удароопасности участка массива горных пород по результатам регистрации его сейсмоакустической активности// Записки Горного Института. 2015 г, Том 216, с. 62-75. <http://pmi-old.spmi.ru/sites/default/files/pdfarticle/62-75.pdf>
10. Носов В.В. Контроль прочности неоднородных материалов методом акустической эмиссии// Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 469-479 <https://cyberleninka.ru/article/v/kontrol-prochnosti-neodnorodnyh-materialov-metodom-akusticheskoy-emissii>
11. Носов В.В., Махмудов Х.Ф. Связь акустической эмиссии упруго нагруженных заготовок и качества проката из них // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки.2016, т.21, № 3. С. 1195-1198. http://www.docme.ru/doc/1641137/svyaz._akusticheskoy-emissii-uprugonagruzhennyh-zagotovok-i..
12. Носов В.В. Акустико-эмиссионная диагностика качества металлургического сляба на основе моделирования процесса разрушения и пластической перестройки структуры материала/ XXIII Петербургские чтения по проблемам прочности, посвященной 100-летию ФТИ им. А.Ф. Иоффе и 110-летию со дня рождения чл.-кор. АН СССР А.В. Степанова, Санкт-Петербург, Россия, 10-12 апреля 2018 г. Санкт-Петербург. [http://nanomat.spbu.ru/sites/default/files/Programma%20chteniy%20\(proekt\).pdf](http://nanomat.spbu.ru/sites/default/files/Programma%20chteniy%20(proekt).pdf)
13. ПБ 03-593-03 Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов и технологических трубопроводов. Основной документ, регламентирующий общие положения проведения АЭ контроля в промышленности. Распространяется практически на все виды оборудования. Утвержден Ростехнадзором и является основой всех отраслевых методических документов по АЭ-контролю. <https://mooml.com/d/normativnye-dokumenty-po-nadzoru-v-oblasti-stroitelstva/normativnye-dokumenty-po-gortekhnadzoru/14894/>
14. ГОСТ Р 55045-2012. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Термины, определения и обозначения. <http://docs.cntd.ru/document/1200096172>

15. Nosov V.V. Bump hazard evaluation of a rock mass area as a result of its seismic acoustic activity registration/ Journal of Mining Institute. 2015. Vol. 216. P. 62-76 (Оценка безопасности участка массива горных пород по результатам регистрации его сейсмоакустической активности)

5.2. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студента

1. Физические основы акустического контроля: Учебно- методический комплекс / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: А.И. Потапов, В.В. Носов. СПб, 2016. 151 с. <http://old.spmi.ru/system/files/lib/uch/metodichki/2016-205.pdf>

2. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования: Учебное пособие 2016, 2-е изд. Испр и доп, «Лань», СПб, - 376 с. <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/diagnostika-mashin-i-oborudovaniya-72902234/> //

3. Носов В.В. Механика композиционных материалов. Лабораторные работы и практические занятия: Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2013, 2-е изд. перераб. и доп., 240 с.: ил. <https://lanbook.com/catalog/inzhenerno-tehnicheskie-nauki/mehanika-kompozicionnyh-materialov-laboratornye-raboty-i-prakticheskie-zanyatiya-60945806/>

4. Носов В.В., Матвиев И.В. Механика неоднородных материалов. Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2017, 2-е изд. испр. и доп. , 276 с <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/mehanika-neodnorodnyh-materialov-72893571/>

5. Носов В.В, Ямилова А.Р. Метод акустической эмиссии. Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2017, 304 с. <https://lanbook.com/catalog/mashinostroenie/metod-akusticheskoy-emissii-72893573///>

6. Материально-техническое оснащение аудиторий:

Специализированные аудитории, используемые при проведении занятий лекционного типа оснащены мультимедийными проекторами и комплектом аппаратуры, позволяющей демонстрировать текстовые и графические материалы.

Приложение 1
к образовательной программе –
«Международная специальная краткосрочная
Программа под эгидой Международного центра ЮНЕСКО
«Диагностика состояния и оценка ресурса опасных технических объектов
на основе метода акустической эмиссии»

Учебно-методические материалы

- 1) Методические указания для обучающихся по освоению программы
- 2) Тексты лекций
- 3) Методические указания к практическим занятиям
- 4) Методические указания к самостоятельной работе

Введение

Процесс изучения материала программы предусматривает активное использование современных инновационных образовательных технологий. Формы обучения: индивидуальные и групповые. Методы обучения:

- работа с преподавателем, - работа в коллективе обучающихся,
- самостоятельная работа.

При освоении дисциплины используются следующие виды активной и интерактивной форм обучения для достижения запланированных результатов обучения и формирования компетенций:

- совместное погружение в проблемное поле;
- обсуждение сложных вопросов и проблем;
- работа в малых группах; - разборы конкретных ситуаций и т.д. Процесс освоения дисциплины предусматривает следующие работы:

1. Контактная работа (аудиторная работа: лекционные, практические и лабораторные занятия, мастер-классы, консультации);

2. Самостоятельная работа;

3. Контрольные мероприятия (промежуточные и итоговые аттестации).

Методические указания для обучающихся по лекционным занятиям по модулю

Лекция является наиболее экономичным способом передачи учебной информации, т.к. при этом обширный материал излагается концентрировано, в логически выдержанной форме, с учетом характера профессиональной деятельности обучаемых. Лекция закладывает основы научных знаний в обобщенной форме. На лекционных занятиях преподаватель:

- знакомит обучающихся с общей методикой работы над курсом;
- дает характеристику учебников и учебных пособий, знакомит слушателей с обязательным списком литературы;
- рассказывает о требованиях к промежуточной аттестации;
- рассматривает основные теоретические положения курса;
- разъясняет вопросы, которые возникли у обучающихся в процессе изучения курса. Лекционное занятие преследует 5 основных дидактических целей:

- информационную (сообщение новых знаний);
- развивающую (систематизация и обобщение накопленных знаний);
- воспитывающую (формирование взглядов, убеждений, мировоззрения);
- стимулирующую (развитие познавательных и профессиональных интересов);
- координирующую с другими видами занятий.

В процессе прослушивания лекций очень важно умение обучающихся конспектировать наиболее значимые моменты теоретического материала. Конспект помогает внимательнее слушать, лучше запоминать в процессе записи, обеспечивает наличие опорных материалов при подготовке к лабораторным занятиям и промежуточной аттестации. В этой же тетради следует записывать неясные вопросы, требующие уточнения на занятии. Рекомендуется в тетради отвести место для словаря, куда в алфавитном порядке вписываются специальные термины и пояснения к ним.

Методические указания для обучающихся по практическим занятиям по модулю

Практическое занятие – форма систематических учебных занятий, с помощью которых обучающиеся изучают тот или иной раздел определенной научной дисциплины, входящей в состав учебного плана.

Для того чтобы практические занятия приносили максимальную пользу, необходимо помнить, что упражнение и решение заданий проводятся по вычитанному на лекциях материалу и связаны, как правило, с детальным разбором отдельных вопросов лекционного курса. Следует подчеркнуть, что только после усвоения лекционного материала с определенной точки зрения (а именно с той, с которой он излагается на лекциях) он будет закрепляться на практических занятиях как в результате обсуждения и анализа лекционного материала, так и с помощью решения проблемных ситуаций, задач. При этих условиях обучающийся не только хорошо усвоит материал, но и научится применять его на практике, а также получит дополнительный стимул (и это очень важно) для активной проработки лекции.

При самостоятельном решении заданий нужно обосновывать каждый этап решения, исходя из теоретических положений курса. Если обучающийся видит несколько путей решения проблемы, то нужно сравнить их и выбрать самый рациональный. Полезно до начала вычислений составить краткий план решения проблемы. Решение проблемных заданий или примеров следует излагать подробно, вычисления располагать в строгом порядке, отделяя вспомогательные вычисления от основных. Решения при необходимости нужно сопровождать комментариями, схемами, чертежами и рисунками.

Следует помнить, что решение каждого учебного задания должно доводиться до окончательного логического ответа, которого требует условие, и по возможности с выводом. Полученный ответ следует проверить способами, вытекающими из существа данного задания. Полезно также (если возможно) решать несколькими способами и сравнить полученные результаты. Решение заданий данного типа нужно продолжать до приобретения твердых навыков в их решении.

При подготовке к практическим занятиям следует использовать основную литературу из представленного списка, а также руководствоваться приведенными указаниями и рекомендациями. Для наиболее глубокого освоения дисциплины рекомендуется изучать литературу, обозначенную как «дополнительная» в представленном списке. На практических занятиях приветствуется активное участие в обсуждении конкретных ситуаций, способность на основе полученных знаний находить наиболее эффективные решения поставленных проблем, уметь находить полезный дополнительный материал по тематике занятий.

Обучающемуся рекомендуется следующая схема подготовки к занятию:

1. Проработать конспект лекций;
2. Прочитать основную и дополнительную литературу, рекомендованную по изучаемому разделу;
3. Ответить на вопросы плана семинарского занятия;
4. Выполнить домашнее задание;
5. Проработать тестовые задания и задачи;
6. При затруднениях сформулировать вопросы к преподавателю.

В процессе подготовки изучают рекомендованные преподавателем источники литературы, а также самостоятельно осуществляют поиск релевантной информации.

Методические указания для обучающихся по лабораторным занятиям по дисциплине (модулю)

Лабораторные занятия имеют целью углубление и закрепление теоретических знаний, развитие навыков самостоятельного экспериментирования. В ходе лабораторного занятия обучающиеся под руководством преподавателя лично проводят натурные или имитационные эксперименты с целью проверки и подтверждения отдельных теоретических положений учебного курса, приобретают практические навыки работы с вычислительной техникой, овладевают методикой экспериментальных исследований в конкретной предметной области. Порядок проведения лабораторного занятия:

1. Вводная часть: - входной контроль подготовки обучающегося; - вводный инструктаж (знакомство обучающихся с содержанием предстоящей работы, показ способов выполнения отдельных операций, предупреждение о возможных ошибках).

2. Основная часть: - проведение обучающимся лабораторной работы; - текущий инструктаж, повторный показ или разъяснения (в случае необходимости преподавателем исполнительских действий, являющихся предметом инструктирования).

3. Заключительная часть: - оформление отчета о выполнении задания; - заключительный инструктаж (подведение итогов выполнения учебных задач, разбор допущенных ошибок и выявление их причин, сообщение результатов работы каждого обучающегося, объявление о том, что необходимо повторить к следующему занятию).

Методические указания для обучающихся по самостоятельной работе по дисциплине (модулю)

Достижение целей эффективной подготовки обучающихся и развитие профессиональных компетенций невозможно без их целеустремленной самостоятельной работы. Самостоятельная работа обучающихся является составной частью учебной работы и имеет целью закрепление и углубление полученных знаний и навыков, поиск и приобретение новых знаний, в том числе с использованием автоматизированных обучающих систем, а также выполнение учебных заданий, подготовку к предстоящим занятиям, текущему контролю и промежуточной аттестации.

Основная цель данного вида занятий состоит в обучении методам самостоятельной работы с учебным материалом, нормативноправовыми актами, научной литературой, с ситуационными задачами, развитие способности самостоятельно повышать уровень профессиональных знаний, реализуя специальные средства и методы получения нового знания, и использовать приобретенные знания и умения в практической деятельности. Состав самостоятельной работы:

1. Подготовка к лекционным и практическим занятиям:

- чтение текста (учебника, первоисточника, дополнительной литературы и т.д.);
- составление плана текста, графическое изображение структуры текста, конспектирование текста, выписки из текста и т.д.;
- работа с конспектом;
- подготовка вопросов для самостоятельного изучения

2. Подготовка к лабораторным занятиям:

- работа со справочниками и др. литературой;
- формирование отчета о выполнении лабораторного занятия;
- подготовка мультимедиа презентации и докладов к выступлению по результатам лабораторного занятия;

3. Подготовка к промежуточной и итоговой аттестациям:

- повторение всего учебного материала модуля
- аналитическая обработка текста; периодического, продолжающегося издания или сборника как составная часть его основного текста.

Методические указания для обучающихся по промежуточной и итоговой аттестации по дисциплине (модулю)

В период подготовки к промежуточной и итоговой аттестации обучающихся вновь обращаются к пройденному учебному материалу. При этом они не только закрепляют полученные знания, но и получают новые. Подготовка обучающегося к аттестации включает в себя три этапа:

- самостоятельная работа в течение курса;
- непосредственная подготовка в дни, предшествующие промежуточной и итоговой аттестации по темам курса;
- подготовка к ответу на вопросы.

Подготовка к аттестации осуществляется на основании списка вопросов по изучаемому курсу, конспектов лекций, учебников и учебных пособий, научных статей, информации среды интернет. Литература для подготовки к промежуточной аттестации рекомендуется преподавателем. Для полноты учебной информации и ее сравнения лучше использовать не менее двух источников. Обучающийся вправе сам придерживаться любой из представленных в литературе точек зрения по спорной проблеме (в том числе отличной от преподавателя), но при условии достаточной научной аргументации.

Основным источником подготовки к промежуточной и итоговой аттестации является конспект лекций, где учебный материал дается в систематизированном виде, основные положения его детализируются, подкрепляются современными фактами и информацией, которые в силу новизны не вошли в опубликованные печатные источники. В ходе подготовки к аттестации обучающимся необходимо обращать внимание не только на уровень запоминания, но и на степень понимания излагаемых проблем. Для подготовки к аттестации преподаватель проводит консультацию по возникающим вопросам. Промежуточная аттестация проводится по вопросам, охватывающим весь пройденный материал. По окончании ответа преподаватель может задать обучающемуся дополнительные и уточняющие вопросы. Оценка качества подготовки обучающихся осуществляется в двух основных направлениях: оценка уровня освоения дисциплин и оценка уровня сформированности компетенций обучающихся. Предметом оценивания являются знания, умения и практический опыт обучающихся.

Положительно будет оцениваться стремление обучающихся изложить различные точки зрения на рассматриваемую проблему, выразить свое отношение к ней, применить теоретические знания по современным проблемам.

Методические указания для обучающихся по итоговой аттестации по дисциплине (модулю)

Зачет поводят в простой письменной форме по билетам. Структура всех билетов одинакова и содержит тесты два теоретических вопроса.

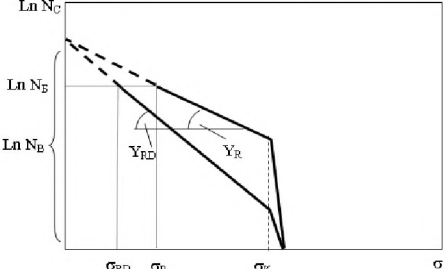
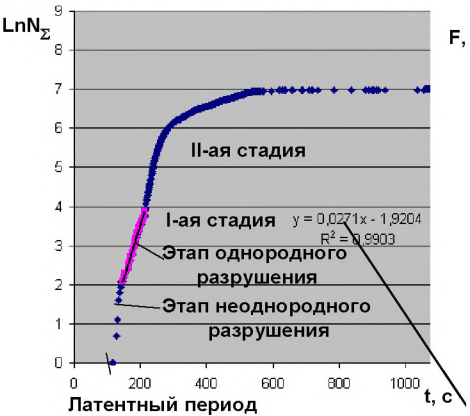
При подготовке ответа на каждый вопрос следует придерживаться структуры соответствующей темы, предложенной в разделе «Содержание разделов учебной дисциплины (модуля)» Рабочей программы.

При подготовке к зачету целесообразно составить план (схему) ответа на каждый вопрос и зафиксировать его на каком-либо носителе. По отдельным этапам такого плана

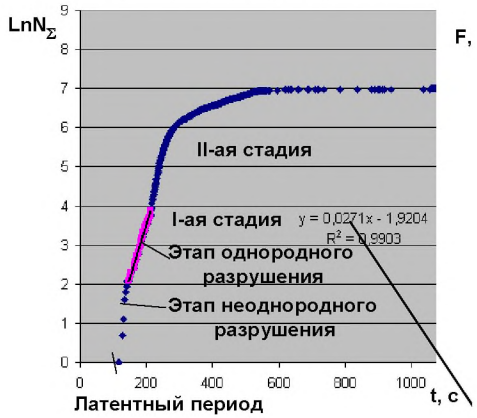
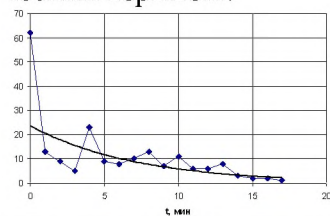
полезно записать основные тезисы. Не следует стараться выучить весь материал наизусть. Важно понять материал, чему будет способствовать концентрация мыслей на ключевых определениях и понятиях.

Примерные тестовые задания к дифференцированному зачету

Вариант 1.

№ п/п	Вопросы	Варианты ответов
1	<p>Что изображено на рисунке?</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Схема кривой усталости; 2. Определение эталонного значения Y_R, необходимое для формирования акустико-эмиссионного диагностического признака; 3. Схема определения базового числа циклов; 4. Всё перечисленное.
2	<p>Что изображено на рисунке?</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Временная зависимость логарифма числа импульсов АЭ образцов сварных соединений с идентификацией этапов разрушения; 2. Используемая для оценки АЭ показателей прочности временная зависимость логарифма числа импульсов АЭ образцов сварных соединений с идентификацией этапов разрушения; 3. Используемая для оценки АЭ показателей прочности временная зависимость логарифма числа импульсов АЭ образцов сварных соединений, получаемая при их равномерном нагружении, с идентификацией этапов разрушения; 4. Ничего из приведённого выше.
3	<p>Что изображено в таблице?</p> $Y_{AE} \leq 0$ $0 < Y_{AE} < Y_R$ $Y_R \leq Y_{AE} \leq [S]Y_R$ $Y_{AE} > [S] Y_R$	<ol style="list-style-type: none"> 1. Неравенства системы уравнений; 2. Неравенства, используемые для оценки степени активности источника АЭ; 3. Неравенства, используемые для оценки работоспособности и классификации источников АЭ; 4. Неравенства, используемые для оценки ресурса технического объекта
4	<p>Что определяется по этой формуле?</p> $N_{ост} = N_B / \exp(Y_{AE} \sigma) - N_{пр}$	<ol style="list-style-type: none"> 1. Исходный ресурс, рассчитываемый с помощью АЭ показателя Y_{AE}; 2. Остаточный ресурс, рассчитываемый с помощью АЭ показателя Y_{AE}; 3. Количество зарегистрированных импульсов АЭ за остаточный промежуток времени; 4. Количество импульсов АЭ за период предварительного нагружения.
5	<p>Оценка степени опасности каких дефектов предложенными концентрационно-кинетическими АЭ показателями наиболее эффективна по отношению к геометрическим?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Микроскопических; 2. Макроскопических; 3. Протяжённых; 4. Крупных непроваров.

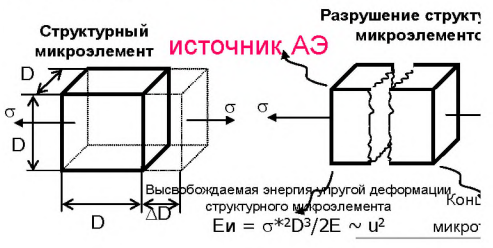
№ п/п	Вопросы	Варианты ответов
6	В чем состоит отличие концентрационно-кинетических показателей от локально-динамического?	<ol style="list-style-type: none"> 1. Имеют более строгий физический смысл; 2. Более точно оценивают ресурс; 3. Диагностические признаки формируются на основе эксплуатационных показателей; 4. Всё выше перечисленное
7	За счёт чего повышается точность оценки ресурса с помощью концентрационно-кинетических показателей?	<ol style="list-style-type: none"> 1. За счёт определения показателя, зависящего от реальной структуры; 2. За счёт определения показателя, зависящего от действующих напряжений; 3. За счёт связи показателя с показателями кривой усталости; <p>За счёт всего выше перечисленного</p>
8	Микро-АЭ -модель параметра X_{AE} имеет вид...	<ol style="list-style-type: none"> 1. $d \ln N_{\Sigma}(t) / dK_H$; 2. γ / KT; 3. $\gamma \sigma_p / KT$; 4. $d \ln N_{\Sigma} / dt$
9	Каким образом ослабляется влияние аддитивных помех на оценку диагностических параметров во время регистрации АЭ при изменении характеристик амплитудных распределений сигналов АЭ?	<ol style="list-style-type: none"> 1. Путём определения соотношения значений акустико-эмиссионного коэффициента в зависимости от выбранного закона распределения числа импульсов АЭ по амплитудам 2. Корректировкой выбранного закона распределения числа импульсов АЭ по амплитудам 3. Изменением уровня дискриминации аппаратуры АЭ 4. Всем перечисленным
10	Каким образом оценивается информативность диагностических параметров АЭ?	<ol style="list-style-type: none"> 1. Величиной коэффициента корреляции их значений со значениями параметра состояния; 2. Количеством получаемой информации по результатам диагностирования 3. Величиной абсолютной погрешности параметра состояния 4. Всем перечисленным
11	<p>Что изображено на рисунке?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Схема кривой усталости; 2. Определение эталонного значения Y_R, необходимое для формирования акустико-эмиссионного диагностического признака; 3. Схема определения базового числа циклов; 4. Всё перечисленное.

№ п/п	Вопросы	Варианты ответов
12	<p>Что изображено на рисунке?</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Временная зависимость логарифма числа импульсов АЭ образцов сварных соединений с идентификацией этапов разрушения; 2. Используемая для оценки АЭ показателей прочности временная зависимость логарифма числа импульсов АЭ образцов сварных соединений с идентификацией этапов разрушения; 3. Используемая для оценки АЭ показателей прочности временная зависимость логарифма числа импульсов АЭ образцов сварных соединений, получаемая при их равномерном нагружении, с идентификацией этапов разрушения; 4. Ничего из приведённого выше.
13	<p>Какие первичные параметры АЭ используются для оценки удароопасности массива горных пород?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. число импульсов АЭ; 2. суммарную и максимальную амплитуды, и статистические параметры амплитудных распределений; 3. суммарную энергию импульсов, зарегистрированных при горном ударе или после динамического воздействия на массив посредством технологического взрыва; 4. Всё вышеперечисленное
14	<p>Какова степень удароопасности массива по приведённым результатам регистрации СА, вызванной технологическим взрывом?</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокая; 2. Низкая; 3. Средняя; 4. Повышенная
15	<p>Какой вид нагружения используется для проведения АЭ диагностирования состояния участка массива горных пород?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Метод полной разгрузки; 2. Разгрузка после проведения технологического взрыва; 3. Равномерно возрастающая нагрузка; 4. Постоянная нагрузка.
16	<p>Какие области применения метода АЭ диагностирования считаются новыми?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Области доминирования статистического подхода к поиску корреляций между первичными параметрами АЭ и параметрами состояния объекта контроля; 2. Область высокочастотной вибродиагностики; 3. Контроль подшипниковых опор; 4. Всё вышеперечисленное.

№ п/п	Вопросы	Варианты ответов
17	В каком направлении оптимизация АЭ контроля наиболее эффективна?	<ol style="list-style-type: none"> 1. В направлении создания высокочувствительной аппаратуры регистрации сигналов АЭ; 2. В направлении создания нового методического обеспечения; 3. В направлении модернизации методического обеспечения с переходом от статистических к физическим АЭ-показателям и критериям; 4. В любом из вышеназванных направлений.
18	Какие аргументы позволяют отнести концентрационно-кинетические АЭ показатели к нано характеристикам прочности материалов?	<ol style="list-style-type: none"> 1. Акустическая эмиссия проявляет себя при макро- и микромасштабной перестройке структуры элементов размером порядка 100 – 1000 нм; 2. размеры разрушаемых элементов структурной гетерогенности различных объектов колеблются в пределах 10 м-1 нм; 3. размеры молекулярных связей и их активационные объёмы наномасштабны и составляют величину порядка 0,1-10 нм и 0,01-1000 нм³ соответственно; 4. Всё выше перечисленные.
19	Чем отличаются основанные на микромеханической модели АЭ методики АЭ диагностирования?	<ol style="list-style-type: none"> 1. Использованием большого количества параметров АЭ; 2. Использованием универсальных физических констант, кинетических закономерностей процесса разрушения и явления АЭ; 3. Использованием высокочувствительной аппаратуры; 4. Всем выше перечисленным.
20	Почему создаваемые на базе разрабатываемой методологии технологии АЭ контроля можно отнести к категории нанотехнологий?	<ol style="list-style-type: none"> 1. Потому, что акустическая эмиссия проявляет себя при макро- и микромасштабной перестройке структуры элементов размером порядка 100 – 1000 нм; 2. Потому, что размеры разрушаемых элементов структурной гетерогенности различных объектов колеблются в пределах 10 м-1 нм; 3. Потому. Что размеры молекулярных связей и их активационные объёмы наномасштабны и составляют величину порядка 0,1-10 нм и 0,01-1000 нм³ соответственно; 4. В соответствии с терминологией, принятой Государственной корпорацией «Российская корпорация нанотехнологий»

Вариант 2.

№ п/п	Вопросы	Варианты ответов
1	<p>Диагностические признаки какого этапа процесса разрушения здесь приведены?</p> <hr/> $d^2\xi/dt^2 < 0 \text{ при } \sigma = \text{const}$ $d^2 \ln \xi / dt^2 < 0 \text{ при } \dot{\sigma} = \text{const}$ <hr/> $dk_{AE}/dt < 0 \text{ (} dP_{AE}/dt < 0 \text{)}$	<ol style="list-style-type: none"> 1. мелкодисперсного неоднородного; 2. мелкодисперсного однородного; 3. образования и роста трещины; 4. пластического.
2	<p>Что означает коэффициент k у параметров kY_{AE} и $1/kY_{AE}$?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Коэффициент пропорциональности между нагрузкой и номинальными напряжениями в материале $k = \sigma/F$; 2. Коэффициент подобия диагностического и рабочего нагружения; 3. Константа АЭ испытаний; 4. Ничего из перечисленного.
3	<p>Для чего вводится коэффициент k у параметров kY_{AE} и $1/kY_{AE}$?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Для обеспечения корректности нагружения; 2. Для повышения контролепригодности; 3. Для повышения информативности; 4. Всё вышеперечисленное.
4	<p>Каким образом оценивается параметр Y_R диагностического признака таблицы?</p> <hr/> $Y_{AE} \leq 0$ <hr/> $0 < Y_{AE} < Y_R$ <hr/> $Y_R \leq Y_{AE} \leq [S] Y_R$ <hr/> $Y_{AE} > [S] Y_R$	<ol style="list-style-type: none"> 1. На основе справочных данных о параметрах кривых усталости; 2. На основе анализа кривых усталости; 3. На основе разрушающих АЭ-испытаний; 4. Любым из перечисленных способов.
5	<p>Как определяется параметр N_B формулы по оценке ресурса</p> <hr/> $N_{OCT} = N_B / \exp(Y_{AE} \sigma) - N_{IP} \quad ?$	<ol style="list-style-type: none"> 1. По кривой усталости посредством экстраполяции линейного участка полу логарифмированной зависимости на логарифмированную ось количества разрушающих циклов; 2. По формуле $N_B = \omega_N C * \tau_0 / C_0 \exp(U_0 / KT)$, где ω_N – частота циклического нагружения. 3. По формуле $N_B = \exp(\ln N_G + \sigma_R Y_R)$, где $N_G = 2 \cdot 10^6$ – число циклов, соответствующих перегибу кривой усталости, m- показатель степени кривой усталости. 4. Любым из перечисленных способов


№ п/п	Вопросы	Варианты ответов
6	<p>Что означает параметр ΣL_{AE} в формуле расчёта коэффициента перекрытия сигналов АЭ ?</p> $K_{пер}(t) = \Sigma L_{AE} / \Delta t,$	<ol style="list-style-type: none"> 1. суммарную длительность сигналов АЭ в интервале Δt 2. суммарное количество выбросов в интервале Δt 3. суммарную энергию сигналов АЭ в интервале Δt 4. суммарную амплитуду сигналов АЭ в интервале Δt
7	<p>Что означает параметр $P_{\Delta t}$, в формуле АЭК $k_{AE} = V P_{\Delta t} P_f P_U$</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Вероятность регистрации сигналов в заданном частотном диапазоне; 2. Вероятность регистрации сигналов в заданном временном диапазоне; 3. Вероятность регистрации сигналов в заданном амплитудном диапазоне; 4. Контролируемый объём материала
8	<p>Что означает параметр P_f, в формуле АЭК $k_{AE} = V P_{\Delta t} P_f P_U$</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Вероятность регистрации сигналов в заданном частотном диапазоне; 2. Вероятность регистрации сигналов в заданном временном диапазоне; 3. Вероятность регистрации сигналов в заданном амплитудном диапазоне; 4. Всё вышеперечисленное
9	<p>Что означает параметр P_U, в формуле АЭК $k_{AE} = V P_{\Delta t} P_f P_U$</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Вероятности регистрации сигналов в заданном частотном диапазоне; 2. Вероятности регистрации сигналов в заданном временном диапазоне; 3. Вероятности регистрации сигналов в заданном амплитудном диапазоне; 4. Всё вышеперечисленное
10	<p>Что означает параметр V, в формуле АЭК $k_{AE} = V P_{\Delta t} P_f P_U$</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Вероятность регистрации сигналов в заданном частотном диапазоне; 2. Вероятность регистрации сигналов в заданном временном диапазоне; 3. Вероятность регистрации сигналов в заданном амплитудном диапазоне; 4. Контролируемый объём материала
11	<p>Какие виды амплитудных распределений сигналов АЭ наблюдаются при анализе первичной АЭ информации?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Равномерное; 2. Экспоненциальное (показательное); 3. С наличием максимума; 4. Любое из перечисленных
12	<p>Что изображено на рисунке?</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Преобразование АЭ в электрический сигнал; 2. Тракта сигнала АЭ ; 3. Модель источника сигнала АЭ; 4. Всё перечисленное.

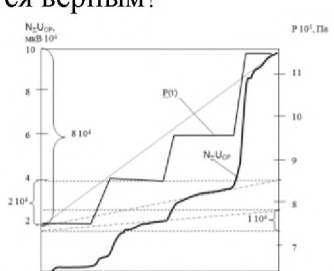
№ п/п	Вопросы	Варианты ответов
13	Чем объясняется рост амплитуды сигнала АЭ, наблюдаемый при повышении скорости нагружения или деформирования объекта контроля?	<ol style="list-style-type: none"> 1. Повышением предела прочности структурных элементов материала; 2. Повышением значений акустико-эмиссионного коэффициента; 3. Понижением порога чувствительности аппаратуры; 4. Повышением контролируемого объёма материала.
14	Чем объясняется рост числа импульсов АЭ, наблюдаемый при увеличении размера структурного элемента объекта контроля?	<ol style="list-style-type: none"> 1. Повышением значений высвобождаемой при разрушении элемента значений энергии и амплитуд сигналов АЭ; 2. Повышением значений длительности импульсов АЭ, происходящим при перекрытии сигналов; 3. Понижением порога чувствительности аппаратуры АЭ; 4. Повышением контролируемого объёма материала.
15	С увеличением частоты упругих колебаний коэффициент затухания упругих волн в стали...	<ol style="list-style-type: none"> 1. растёт; 2. падает; 3. не изменяется; 4. ведёт себя в зависимости от частоты.
16	С увеличением расстояния источника сигнала АЭ до преобразователя АЭ амплитуда и количество регистрируемых сигналов....	<ol style="list-style-type: none"> 1. ведут себя в зависимости от материала 2. увеличиваются; 3. не изменяются; 4. уменьшаются;
17	Аддитивные помехи в оценке концентрационно-кинетических показателей связаны с...	<ol style="list-style-type: none"> 1. акустическими и электромагнитными шумами; 2. разбросом порога чувствительности из-за невоспроизводимости характеристик акустического контакта между объектами контроля и преобразователями АЭ; 3. нестабильности АЭК при переходе от испытания к испытанию и т.д.; 4. всем перечисленным
18	Мультипликативные помехи в оценке концентрационно-кинетических показателей связаны с...	<ol style="list-style-type: none"> 1. ростом амплитуды сигналов АЭ, 2. неравномерностью амплитудно-частотных характеристик сигналов АЭ, 3. нестабильностью коэффициента усиления аппаратуры АЭ при регистрации сигналов 4. Всем перечисленным
19	При нагружении с постоянной скоростью рост активности АЭ может свидетельствовать...	<ol style="list-style-type: none"> 1. о развитии дефекта при $d^2 \ln N(t)/dt^2 > 0$; 2. о присутствии не прогрессирующего концентратора при $d^2 \ln N(t)/dt^2 \approx 0$; 3. о кинетически неоднородном разрушении и отсутствии существенной концентрации напряжений при $d^2 \ln C(t)/dt^2 < 0$; 4. обо всём из перечисленного

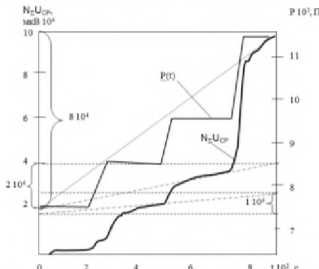
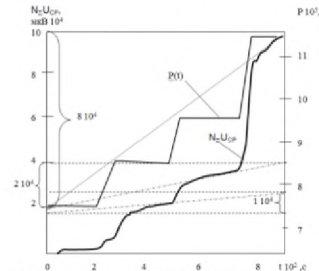
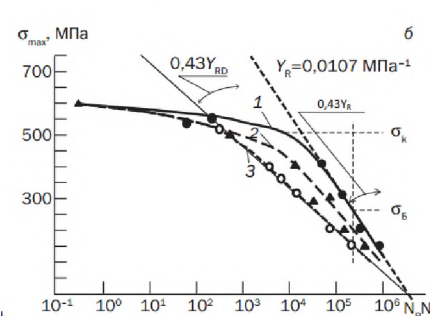
№ п/п	Вопросы	Варианты ответов
20	Что входит в систему регистрации сигналов АЭ?	1. Преобразователь АЭ, предварительный усилитель; 2. Основной усилитель и блок обработки сигналов; 3. ЭВМ с программой обработки первичной информации; 4. Всё из перечисленного

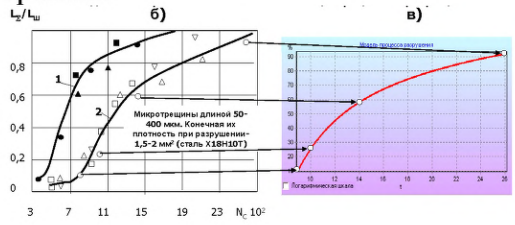
Вариант 3.

№ п/п	Вопросы	Варианты ответов
1	На чём может быть основан расчёт координат источника АЭ?	1. Только на определении разницы времён прихода сигналов АЭ; 2. Только на определении разницы амплитуд сигналов АЭ; 3. На определении разницы времён прихода сигналов АЭ или разницы амплитуд сигналов АЭ; 4. Ничем из перечисленного
2	Какое механическое воздействие производят на сосуды давления во время проведения АЭ контроля?	1. Производят гидро-нагружение; 2. Производят пневмо-нагружение; 3. Производят сжатие корпусов; 4. Любое из перечисленных, которое подобно рабочему нагружению.
3	При каких испытаниях и в связи с чем применение акустико-эмиссионного диагностирования сосудов давления наиболее актуально проведения?	1. При пневмоиспытаниях в связи с необходимостью обеспечения безопасности; 2. При внешнем давлении в связи со слабой контролепригодностью других методов контроля 3. При гидроиспытаниях, так как в данном случае это единственный метод, позволяющий контролировать образование и развитие опасного дефекта; 4. Всё перечисленное
4	Какие из перечисленных мероприятий подразумевает проведение акустико-эмиссионного диагностирования сосудов давления?	1. Контроль сплошности сварных соединений и зон основного металла неразрушающими методами дефектоскопии, контроль толщины стенки неразрушающими методами; 2. Измерение твёрдости с помощью переносных приборов, лабораторные исследования (при необходимости) химического состава, свойств и структуры материала основных элементов; 3. Гидравлические или пневматические испытания, прогнозирование условий и сроков дальнейшей эксплуатации (ресурса) сосуда. 4. Все перечисленные

№ п/п	Вопросы	Варианты ответов
5	Каким образом определяют величину параметра N_B формулы оценки исходного ресурса $N_c = N_B / \exp(W_{AE})$?	<ol style="list-style-type: none"> 1. Как значение, отсекаемое экстраполированной усталостной прямой на ось логарифма количества циклов до разрушения; 2. По формуле $N_B = \exp(\ln N_G + \sigma_R Y_R)$, где N_G — базовое число циклов, (2×10^6); σ_R — предел выносливости при заданном коэффициенте асимметрии R цикла рабочих напряжений, Y_R — угловой коэффициент кривой усталости, 3. По формуле $N_B = \tau_0 \omega_N \exp[U_0/(KT)]$, где ω_N — частота циклического нагружения. 4. Любым из предложенных способов
6	Что такое и как рассчитывается коэффициент K_H в формуле $W_{AE} = d \ln \xi / d K_H$	<ol style="list-style-type: none"> 1. Коэффициент долговечности $K_H = N_i / N_{раб}$, где N_i, $N_{раб}$ — диагностическая и рабочее число циклов нагружения; 2. Коэффициент нагрузки, $K_H = F_i / F_{раб}$, где F_i, $F_{раб}$ — диагностическая и рабочая нагрузки (давление); 3. Коэффициент чувствительности диагностирования $K_H = N_i / N_{раб}$, где N_i, $N_{раб}$ — диагностическая и рабочее число импульсов АЭ; 4. Коэффициент запаса прочности $K_H = N_i / N_{раб}$, где N_i, $N_{раб}$ — критическое и рабочее число циклов нагружения;
7	Что изображено на фотографии? 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Преобразователь АЭ; 2. Преобразователь АЭ, установленный на волновод; 3. Предварительный усилитель; 4. Основной усилитель с блоком обработки сигналов АЭ
8	Какие сведения приводятся в протоколе испытаний сосудов, проведённых с применением АЭ диагностирования?	<ol style="list-style-type: none"> 1. Данные об объекте контроля; 2. Данные о применяемом оборудовании АЭ; 3. Данные о нагружении (график нагрузки) и местах установки преобразователей АЭ; 4. Всё выше приведённое.
9	Какими правилами руководствуются при проведении АЭ диагностирования сосудов давления?	<ol style="list-style-type: none"> 1. “Правилами организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов” (ПБ 03-593-03); 2. РД 34.17.443-97 Методика проведения АЭ контроля паропроводов в процессе эксплуатации; 3. РД 34.17.444-97 Методика проведения АЭ контроля при испытаниях трубопроводов тепловых сетей на герметичность и плотность; 4. Всеми приведёнными

№ п/п	Вопросы	Варианты ответов
10	<p>Каким образом определяются параметры формулы $kY_{AE} = [\ln N_i - \ln N_j] / (P_i - P_j)$, используемой при неразрушающей оценке прочности по результатам АЭ испытания сосудов давления, подверженных «ступенчатому» нагружению?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. $N_{i,j}$, - максимальные скорости счета сигналов АЭ при выдержке; $P_{i,j}$- соответствующие им значения постоянного давления; 2. $N_{i,j}$, - минимальные скорости счета сигналов АЭ при выдержке; $P_{i,j}$- соответствующие им значения постоянного давления; 3. $N_{i,j}$, - средние значения скорости счета сигналов АЭ при выдержке; $P_{i,j}$- соответствующие им значения постоянного давления; 4. $N_{i,j}$, - минимальные скорости счета сигналов АЭ при выдержке; $P_{i,j}$- значения постоянного давления в начале и конце регистрации сигналов АЭ
11	<p>По какой формуле рассчитывается коэффициент запаса выносливости сосуда после проведения АЭ контроля?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. $S = [\sigma] / \sigma$ 2. $S_{ст} = [\sigma] / \sigma_{max}$ 3. $S = \frac{\sigma_R Y_R}{\sigma_a Y_{AE}}$; 4. $S = \frac{\sigma_B Y_R}{\sigma_a Y_{AE}}$
12	<p>Какой способ оценки диагностического параметра Y_{AE} по следующим данным АЭ испытаний стального цилиндрического сосуда диаметром 660 мм, высотой 1500 мм и толщиной стенки 6 мм является верным?</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. $Y_{AE(2-3)} = d \ln N_{\Sigma U_{CP}} / d\sigma = (\ln 2 - \ln 1) 6 / [(9,5 - 8,5) 10^{-1} 330] = 0,126 \text{ МПа}^{-1}$, 2. $Y_{AE(3-4)} = d \ln N_{\Sigma U_{CP}} / d\sigma = (\ln 8 - \ln 2) 6 / [(11,5 - 9,5) 10^{-1} 330] = 0,126 \text{ МПа}^{-1}$. 3. $Y_{AE(2-4)} = d \ln N_{\Sigma U_{CP}} / d\sigma = (\ln 8 - \ln 1) 6 / [(11,5 - 8,5) 10^{-1} 330] = 0,126 \text{ МПа}^{-1}$. 4. Верен любой из приведённых примеров оценки.
13	<p>Что такое «линейная кластеризация источников сигналов АЭ».</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Локальное возбуждение сигналов АЭ; 2. Определение координат источников АЭ; 3. Линеаризация координат источников АЭ; 4. Переход разрушения на вторую стадию.

№ п/п	Вопросы	Варианты ответов
14	<p>На рисунке приведены результаты испытаний стального цилиндрического сосуда диаметром 660 мм, высотой 1500 мм и толщиной стенки 6 мм. Оценить работоспособность, если $Y_R=0,01 \text{ МПа}^{-1}$, $[S]=4$</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Работоспособный; 2. Ограниченная работоспособность; 3. Неработоспособный; 4. Повышенная работоспособность
15	<p>Какие из АЭ-показателей прочностного состояния наиболее информативны?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. механические; 2. статистические; 3. Микромеханические; 4. Концентрационно-кинетические
16	<p>На рисунках приведены результаты АЭ испытаний стального сосуда, геометрические параметры которого неизвестны.</p>  <p>Какой из расчётов исходного ресурса сосуда при рабочем давлении 1МПа и следующих данных циклических испытаний образцов, выполненных из материала сосуда, является верным?</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. $N_c = N_B / \exp(Y_{AE} \cdot \sigma_{раб})$, $Y_{AE} \cdot \sigma_{раб} = (\ln 8 - \ln 2) / (1,15 - 0,95) = 6,931$ $N_B = 5000000$ $N_c = N_B / \exp(W_{AE}) = 5000000 / \exp 6,931 = 4990$; 2. $N_c = N_B / \exp(W_{AE})$, $W_{AE} = \ln(N_{\Sigma 4} / N_{\Sigma 2}) / (K_4 - K_2) = (\ln 8 - \ln 2) / (1,15 - 0,95) = 6,931$ $N_B = 5000000$ $N_c = N_B / \exp(W_{AE}) = 5000000 / \exp 6,931 = 4990$; 3. $N_c = N_B / \exp(W_{AE}) - N_{ПР}$, $W_{AE} = \ln(N_{\Sigma 4} / N_{\Sigma 2}) / (K_4 - K_2) = (\ln 8 - \ln 2) / (1,15 - 0,95) = 6,931$ $N_B = 5000000$ $N_c = N_B / \exp(W_{AE}) = 5000000 / \exp 6,931 = 4990$; 4. $N_c = N_B / \exp(W_{AE}) - N_{ПР}$, $W_{AE} = \ln(N_{\Sigma 4} / N_{\Sigma 2}) / (K_4 - K_2) = (\ln 8 - \ln 2) / (1,15 - 0,95) = 6,931$ $N_B = 10000000$ $N_c = N_B / \exp(W_{AE}) = 10000000 / \exp 6,931 = 9980$;

№ п/п	Вопросы	Варианты ответов
17	<p>Каков физический смысл данных выражений?</p> $N_{\Sigma}(t) = k_{AE}(t) \cdot C_0 \int_q^{q_1(t)} \Psi(y, \varepsilon(t)) \left(1 - \exp\left(-\int_0^t \frac{d\bar{\varepsilon}}{\tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma(\bar{\varepsilon})}{RT}\right)}\right) dy \right)$ $c(t) = C_0 \int_q^{q_1(t)} \Psi(y, \varepsilon) \left(1 - \exp\left(-\int_0^t \frac{d\bar{\varepsilon}}{\tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma(\bar{\varepsilon})}{RT}\right)}\right) dy \right)$ $\Psi(y, \varepsilon) = \begin{cases} 0, \gamma \in [0, q], \\ A(\varepsilon) \cdot \left(\frac{k}{\lambda}\right) \cdot \left(\frac{\gamma}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{\gamma}{\lambda}\right)^k\right), \gamma \in [q, q_1(\varepsilon)], \end{cases}$ $A(\varepsilon) = \frac{1}{\int_q^{q_1(\varepsilon)} \left(\frac{k}{\lambda}\right) \cdot \left(\frac{\gamma}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{\gamma}{\lambda}\right)^k\right) dy}$ $q_1(\varepsilon) = \begin{cases} q_{1H}, \varepsilon \in [0, \varepsilon_p], \\ \frac{\alpha_\varepsilon}{\ln[b_\varepsilon(\varepsilon(t) - c_\varepsilon)]}, \varepsilon \in [\varepsilon_p, \varepsilon^*], \end{cases}$	<ol style="list-style-type: none"> 1. Моделируются временные зависимости параметров акустической эмиссии, концентрации макротрещин и функции распределения коэффициента структуры по структурным элементам при пластической деформации; 2. Моделируется временная зависимость параметров акустической эмиссии при пластической деформации; 3. Моделируется функция распределения коэффициента структуры по структурным элементам при пластической деформации; 4. Выражения не имеют физического смысла.
18	<p>Что изображено на рисунке?</p> $C(t) = C_0 \int_{\omega_1}^{\omega_2} \psi(\omega) \left[1 - \exp\left(-\frac{t \exp\left(\omega - \frac{U_1}{KT}\right)}{\tau_2}\right) \right] d\omega$ <p>1.1. Выдержка при постоянной нагрузке $\dot{\sigma} = 0$ $d^2C/dt^2 < 0$ "Хвост" распределения $\Psi(\omega)$</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Имитационное моделирование этапа неоднородного разрушения; 2. Имитационное моделирование этапа неоднородного разрушения при постоянной нагрузке и сопоставление с результатами регистрации сигналов акустической эмиссии; 3. Имитационное моделирование этапа однородного разрушения; 4. Имитационное моделирование этапа однородного разрушения при постоянной нагрузке и сопоставление с результатами регистрации сигналов акустической эмиссии.
19	<p>О чём свидетельствует данная диаграмма?</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Адекватность микромеханической модели АЭ результатам регистрации ; 2. Адекватность микромеханической модели АЭ процессу разрушения; 3. О корректности проведения АЭ испытаний; 4. Обо всём выше перечисленном.
20	<p>Что изображено на рисунке?</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Моделируемая зависимость параметров АЭ от нагрузки на объекте с концентратором напряжений, однородное разрушение-эффект Кайзера не проявляется; 2. Проявление эффекта Кайзера на реальном объекте; 3. Моделируемая связь параметров АЭ с нагрузкой для неоднородного разрушения, идеальное проявление эффекта Кайзера; 4. Обобщенная зависимость параметров акустической эмиссии от нагрузки.

ТЕКСТЫ ЛЕКЦИЙ

І ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ КАК МЕТОДА ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ.

1.1. Область применения метода акустической эмиссии и его сравнение с другими видами контроля.

Неразрушающий контроль, диагностика состояния и прогнозирование работоспособности машин, оборудования, конструкций и сооружений, являясь одной из составляющих общей проблемы надёжности, связана с решением таких задач, как предотвращение аварий, оптимизация производственных и ремонтных технологий, обоснование необходимости проведения поддерживающих работоспособность профилактических мероприятий, обеспечение экологически чистых и безопасных условий труда рабочих. В технике используются новые конструкционные материалы, работают и вводятся вновь в эксплуатацию крупномасштабные конструкции, глубокие подземные сооружения, непредвиденное разрушение которых может привести к большим человеческим жертвам и тяжёлым экологическим последствиям.

Из-за недостатков в качестве выпускаемой продукции развитые страны ежегодно теряют до 10 % своего национального дохода. Потери только от дефектов, приводящих к усталости материала в США, составляют более 100 млрд. долл. в год, от коррозии – 200 млрд. долл. в год. Убытки от недостаточно высокого качества машин и сооружений в нашей стране значительно выше, и их существенное сокращение возможно на основе внедрения средств диагностики и контроля, затраты на которые по подсчётам специалистов должны составлять не менее 30 % от стоимости диагностируемого объекта. В области же атомной энергетики, нефте- и газодобывающей промышленности, химической и нефтехимической отраслях, аэрокосмической техники, транспорта и строительства в США, например, они в три раза превосходят стоимость самих сооружений.

На территории России насчитывается около 100 тысяч опасных производств и объектов, из которых около 1500 ядерных, 3000 химических и биологических объектов особой опасности. Средний период чрезвычайных ситуаций составляет 10-15 лет для аварий и катастроф с ущербом до 2 млрд. долларов, 15-45 дней с ущербом до 100 млн. долларов США. Потери от техногенных аварий, катастроф (взрывы, пожары, разрушения, выбросы радиоактивных и отравляющих веществ, крушения и т.п.) и природных катаклизмов (землетрясения, обвалы, ураганы, сели, оползни, наводнения и др.) с каждым годом возрастают на 10-30 %. В нефтяной и газовой промышленности эксплуатируется 206 тыс. км. магистральных газопроводов, 65 тыс. км. магистральных нефтепроводов, более 6 тыс. км. продуктопроводов и более 300 тыс. км. промысловых трубопроводов различного назначения. 1/3 магистральных трубопроводов имеет возраст более 15 лет, в год на газо- и нефтепроводах происходит более 100 аварий и наблюдается тенденция к росту. Применение систем диагностики удорожает продукцию, однако их использование на всех стадиях изготовления, проверки и эксплуатации существенно повышает надёжность объектов контроля и, в конечном счёте, является экономически выгодным.

Превышение числа техногенных катастроф над природными составило 1,2-1,7 раза при темпах роста порядка 10-12% в год; для природных катастроф эта величина была на уровне 7-8% в год. Если к концу XX века экономические ущербы от природных превышали ущербы от техногенных катастроф, то, начиная с первого десятилетия XXI века основной ущерб приносили уже техногенные катастрофы, в том числе крупнейшие – на Саяно-Шушенской ГЭС, морской платформе ВР в Мексиканском заливе, на АЭС «Фукусима-1» (с ущербами от каждой от 5 до 20 млрд. долларов США). Важно, что при этом темпы роста мирового валового продукта составляли 2-3,5% в год. Это в целом указыва-

ет на снижение возможностей мирового сообщества предупреждать и парировать техногенные риски.

В Российской Федерации в последние годы относительная устойчивость числа техногенных катастроф на уровне 350-500 в год сопровождалась ростом общих ущербов от них при постепенном снижении темпов роста ВВП (от 4 до 1% в год). С учетом отмеченных основных закономерностей экономического развития и изменения техногенных рисков для дальнейшего анализа и прогноза состояния и повышения уровня национальной и промышленной безопасности исключительно важное значение имеет развитие средств диагностики и неразрушающего контроля.

Развитие средств диагностики идёт по пути повышения точности и оперативности получения результатов диагностирования на основе разработки новых автоматизированных систем контроля и алгоритмов количественной обработки его данных. В настоящее время для контроля и диагностики машин, приборов и технических объектов используется более 100 физических методов, тысячи типов приборов. Метод акустической эмиссии здесь рассматривается как наиболее перспективный.

Акустическая эмиссия как физическое явление, используемое для исследования веществ, материалов, объектов, а также для неразрушающего контроля и технической диагностики контролируемых объектов, позволяет формировать адекватную систему классификации дефектов и критерии оценки состояния объекта, основанные на реальном влиянии дефекта на объект. Типичные объекты АЭ контроля показаны на рис. 1.1.



Рис.1.1. Наиболее ответственные объекты, подведомственные Ростехнадзору, требующие АЭ контроля их состояния а,г- подъемно-транспортные машины, б,д- трубопроводы, в- сосуды давления

Главной особенностью метода акустической эмиссии является возможность получения информации не только о наличии микротрещин в материале, но и о кинетике микро трещинообразования. Это дает возможность прогнозирования развития процесса разрушения материала. Характерными особенностями метода АЭ контроля, определяющими его возможности и область применения, являются следующие:

- метод АЭ контроля обеспечивает обнаружение и регистрацию только развивающихся дефектов, что позволяет классифицировать дефекты не по размерам, а по степени их опасности;
- метод АЭ контроля обладает весьма высокой чувствительностью к растущим дефектам и позволяет выявить в рабочих условиях приращение трещины порядка долей мм. Предельная чувствительность акустико-эмиссионной аппаратуры по теоретическим оценкам составляет порядка 1×10^{-6} мм², что соответствует выявлению скачка трещины протяженностью 1 мкм на величину 1 мкм;
- свойство интегральности метода АЭ контроля обеспечивает контроль всего объекта с использованием одного или нескольких преобразователей АЭ контроля, неподвижно установленных на поверхности объекта;
- метод АЭ позволяет проводить контроль различных технологических процессов и процессов изменения свойств и состояния материалов. Контроль можно производить при удалении оператора от контролируемого объекта, поэтому контролю доступны такие протяженные объекты, как магистральные трубопроводы. Возможность проведения контроля без выключения конструкции из производственного процесса делает применение метода очень выгодным с точки зрения экономии времени и денежных средств.;
- положение и ориентация объекта не влияет на выявляемость дефектов;
- метод АЭ имеет меньше ограничений, связанных со свойствами и структурой материалов;

АЭ-контроль технического состояния обследуемых объектов проводится только при создании в конструкции напряженного состояния, инициирующего в материале объекта работу источников АЭ. Для этого объект подвергается нагружению силой, давлением, температурным полем и т.д. Выбор вида нагрузки определяется конструкцией объекта и условиями его работы, характером испытаний и приводится в "Программе работ по АЭ контролю объектов".

Обстоятельством, ограничивающим применение метода АЭ, является в ряде случаев трудность выделения сигналов АЭ из помех. Это объясняется тем, что сигналы АЭ являются шумоподобными, поскольку АЭ есть стохастический импульсный процесс. Поэтому, когда сигналы АЭ малы по амплитуде, выделение полезного сигнала из помех представляет собой сложную задачу. При развитии дефекта, когда его размеры приближаются к критическому значению, амплитуда сигналов АЭ и темп их генерации резко увеличивается, что приводит к значительному возрастанию вероятности обнаружения такого источника АЭ.

Целью АЭ контроля является обнаружение, определение координат и слежение (мониторинг) за источниками акустической эмиссии, связанными с неоднородностью на поверхности или в объеме стенки объекта контроля, сварного соединения и изготовленных частей и компонентов. Все индикации, вызванные источниками АЭ, должны быть при наличии технической возможности оценены другими методами неразрушающего контроля. АЭ метод может быть использован для оценки скорости развития дефекта в целях заблаговременного прекращения испытаний и предотвращения разрушения изделия. Также метод АЭ может быть использован для контроля объектов при их изготовлении, в процессе приемочных испытаний, при периодических технических освидетельствованиях, в процессе эксплуатации. Одна из обширных областей применения метода АЭ связана с наблюдением за процессом сварки, что способствует совершенствованию технологии сварки и может существенно повысить надежность сварных соединений.

В ряду рекомендованных Ростехнадзором методов неразрушающего контроля метод АЭ является наиболее характерным пассивным акустическим методом (Рис. 1.2). Информационно метод АЭ основан на анализе связи результатов регистрации акустических волн, излучаемых с поверхности материала, и характеристик процессов их вызывающих. Такими процессами являются, главным образом, повреждение структуры (образование, рост и накопление концентрации микротрещин) и пластические деформации (перемеще-

ние дислокаций). Кроме этого, источниками АЭ могут быть процессы трения и износа, радиационного, химического и электрохимического взаимодействия, утечки жидкости или газа, фазовые превращения.

Сравнительная чувствительность некоторых методов неразрушающего контроля прочности сварных соединений характеризуется данными рис. 1.3, показывающей, что

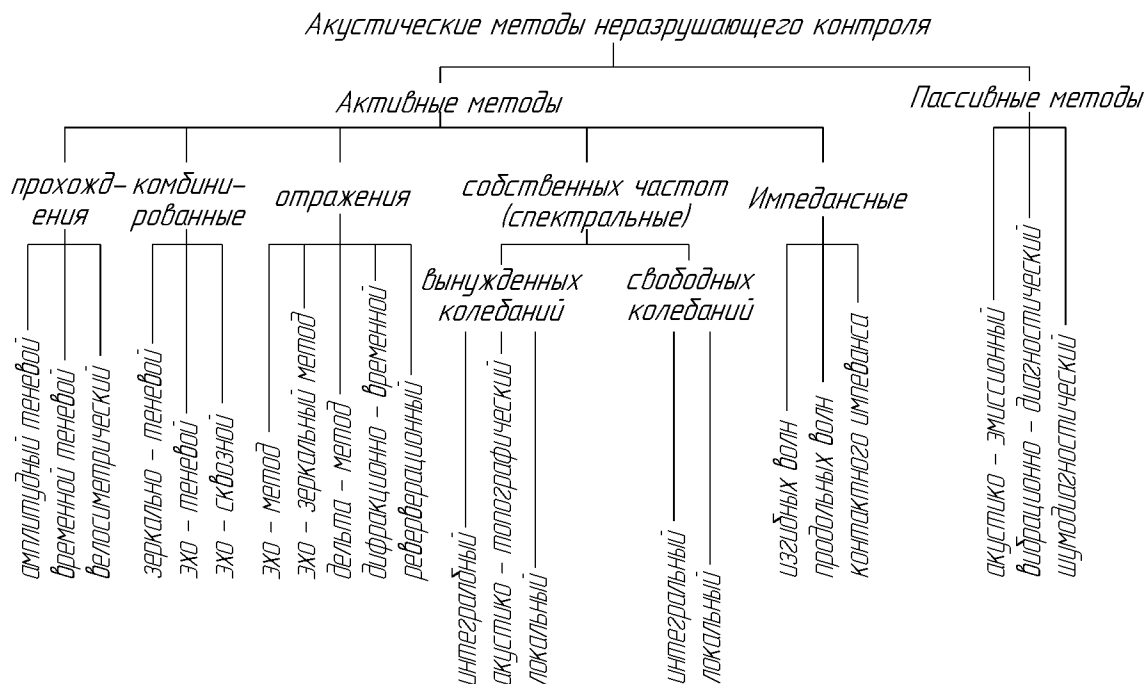


Рис. 1.2. Классификация акустических методов контроля.

P(2a), % 100

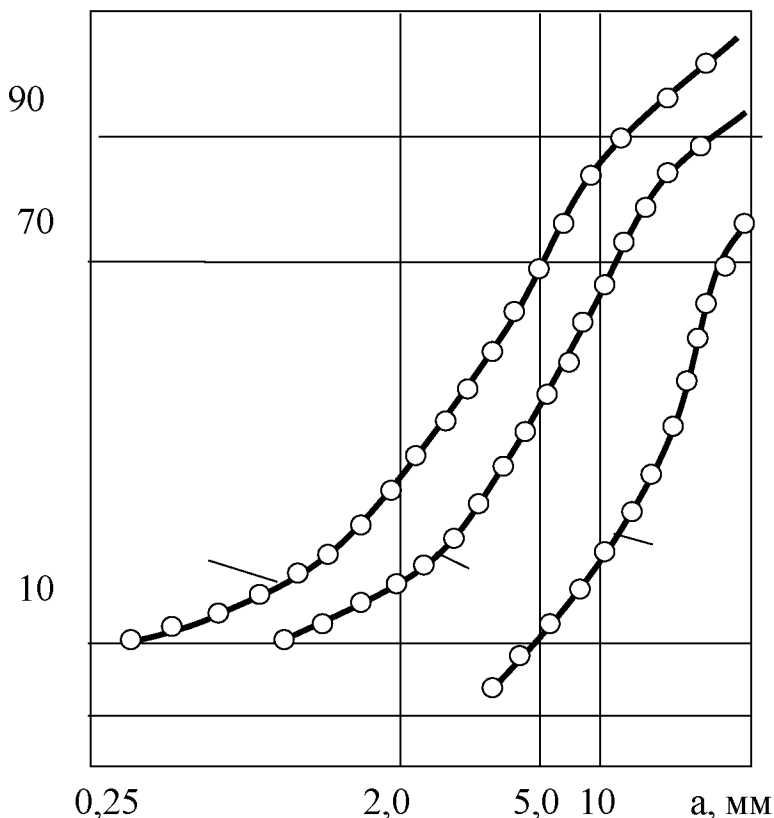


Рис. 1.3. Характеристические кривые чувствительности обнаружения дефектов методами неразрушающего контроля. 1- рентгеновский метод; 2- применение окрашивающих жидкостей; 3-ультразвуковой импульсный метод. а- характерный размер (полуудлина) дефекта; P(2a)- вероятность обнаружения дефекта.

акустические методы обладают высокой чувствительностью к дефектам. Однако применяемые методы контролируют признаки, не всегда обладающие большой диагностической ценностью по отношению к прочности. В частности, радиографический метод, предназначенный для обнаружения трещин и непроваров в сварном шве, не гарантирует выявления дефектов, расположение которых не совпадает с направлением измерений. Капиллярный метод, обладая значительной чувствительностью к поверхностным дефектам типа трещин, не обеспечивает выявления внутренних дефектов. Ультразвуковой метод, обеспечивающий выявление дефектов типа трещин, предъявляет значительные требования к чистоте обработки поверхности околошовной зоны в месте установки приемного датчика. Перечисленные методы используются, как правило, на завершающей стадии изготовления изделий, не дают информации о кинетике повреждений и связанной с ней степени опасности дефектов, что, в свою очередь, затрудняет принятие заключения о состоянии объекта. Данную проблему решает метод АЭ, который позволяет несколькими стационарно расположенными датчиками проконтролировать за одно обследование весь объект, выявляет наиболее опасные развивающиеся дефекты. Эксперименты, выполненные при АЭ-диагностике оборудования, недоступного для контроля традиционными методами, показали чрезвычайную перспективность данного метода для обоснования возможности переназначения проектного срока службы и продления ресурса.

Акустические волны (сигналы АЭ) принимаются через контактирующие с изделием пьезопреобразователи (ПАЭ). Для регистрации сигналов АЭ используются диагностические системы. Различные системы АЭ-контроля показаны на рис.1.4, а характер выявляемых дефектов - на рис. 1.5. Схема прочностного АЭ-контроля изображена на рис. 1.6. Развитию методического обеспечения, выявлению универсальных информативных показателей надежности, составлению математических моделей параметров акустической эмиссии и освоению основанных на них методик АЭ диагностирования в данном пособии уделено основное внимание.

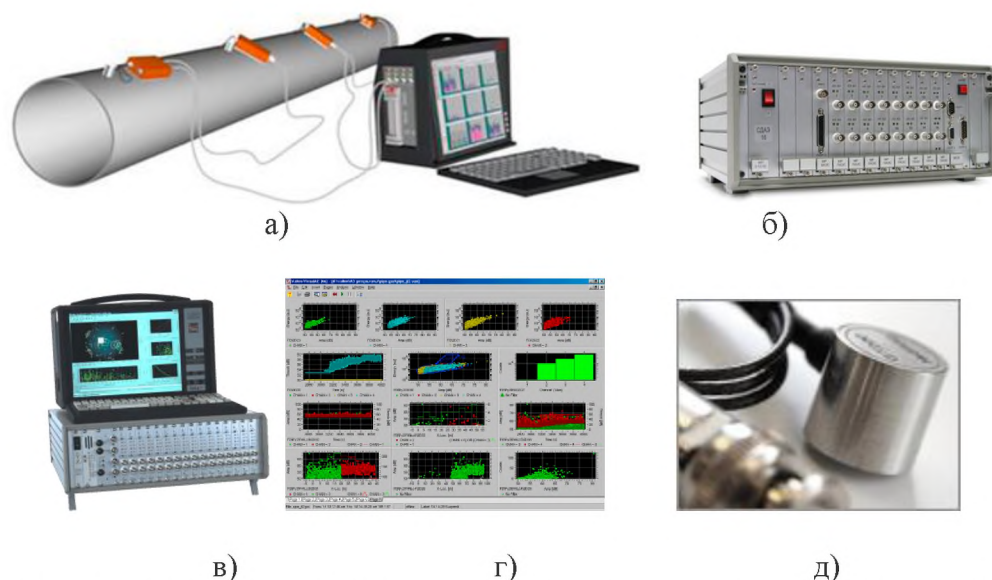


Рис. 1.4. Схематичное изображение акустико-эмиссионного контроля трубопровода системой A-Line 32D производства фирмы «Интерюнис»(а), внешний вид 16-канальной системы фирмы «Промдиагностика» (б) и 32-канальной системы производства Vallen-Systeme (Германия) (в) программная поддержка неограниченного числа графиков в сочетании с многостраничной организацией (г) и внешний вид пьезопреобразователя АЭ (ПАЭ) (д).

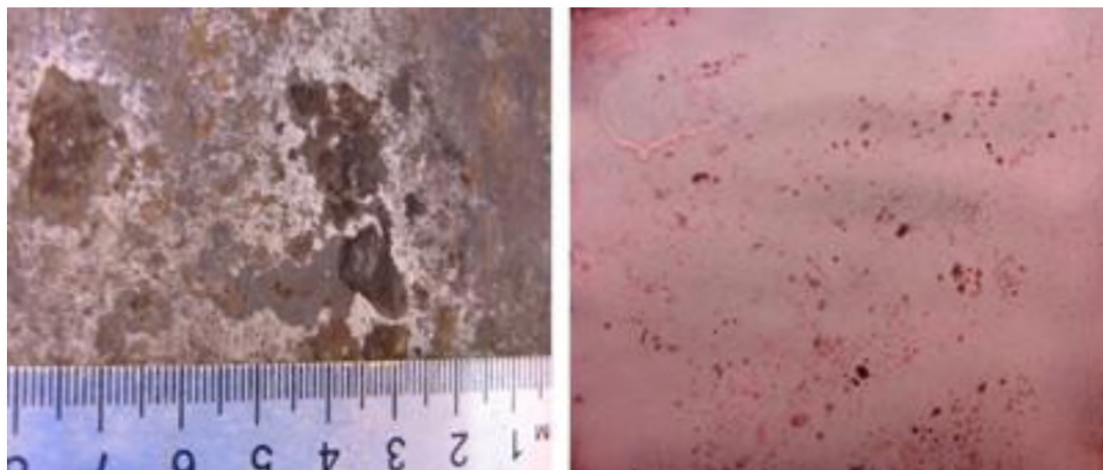


Рис. 1.5. Пример выявляемых методом АЭ участков с локальными коррозионными повреждениями. Слева - язвенная коррозия с глубиной проникновения до 50% толщины стенки трубопровода, справа – индикаторные картины питтинговых коррозионных дефектов с глубиной проникновения до 80% толщины стенки трубопровода.

Схема АЭ-контроля

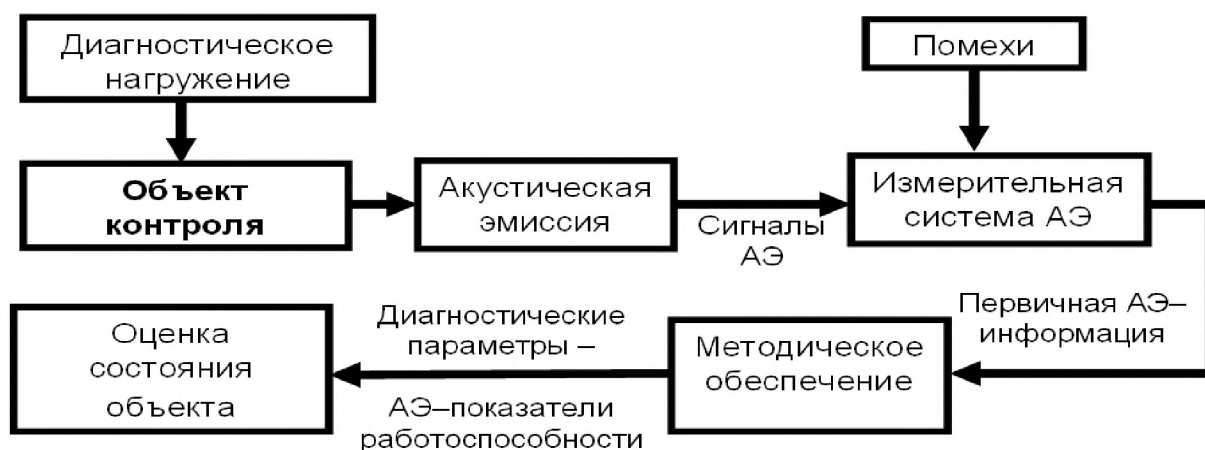


Рис.1.6. Схема прочностного АЭ-контроля.

1.2.История развития метода акустической эмиссии.

Акустико-эмиссионный контроль применялся с самых древних времен для оценки прочности различных, в основном деревянных, объектов, для которых сигналы АЭ обладают амплитудой в звуковом диапазоне, достаточной для восприятия их на слух.

Еще 6500 лет до н. э. гончары прислушивались к звукам, возникавшим при остывании керамики и указывавшим на разрушение структуры материала. При обработке металлов термин "крик олова" (звуковые волны, вызванные перестройкой структуры в чистом олове в процессе пластической деформации) появился среди плавильщиков в Малой Азии приблизительно в 3700 до н. э. Происходивший в XIX веке быстрый рост промышленного производства привел к возрастанию интереса к свойствам различных конструкционных материалов, и к концу века был накоплен большой объем данных об их строении, о происходящих в них процессах изменения структуры и разрушения.

Изучение акустической эмиссии при пластической деформации и росте трещин происходило практически параллельно. В начале XX века связь акустической эмиссии с процессами, происходящими при пластической деформации в различных металлах и сплавах была описана в работах С. И. Губкина, Р. Таммана, К. Чохральского, А. Портевена, А. Ле Шателье, Р. Андерсена, Э. Шайля, Ф. Фёрстера. В 1920-е годы А. Ф. Иоффе и М. В. Класен наблюдали звуковые эффекты, сопровождавшие процесс деформации кристаллов ка-

менной соли и цинка. В 1948 году Вэррен П. Мейсон, Герберт Дж. Мак-Скимин и Вильям Шоклей (США) предположили, что регистрация сигналов АЭ позволяет следить за движением дислокаций в металлах, так как при их движении возникают волны напряжений. Начало исследованию явления АЭ в СССР положили проводившиеся в 1950-х годах по инициативе акад. А. А. Скочинского и акад. Г. А. Гамбурцева в Институте физики Земли им. О. Ю. Шмидта и Институте горного дела им. А. А. Скочинского опыты по регистрации деформационных шумов в горных породах, значительные успехи были достигнуты в области использования явления АЭ для прогнозирования выбросов угля и газа в шахтах. В 1953 году в диссертации немецкого ученого Джозефа Кайзера было отмечено появление шумов при деформации широкого круга материалов, изменение параметров этих шумов при напряжениях, соответствующих пределам упругости, текучести и прочности, установлено явление невоспроизводимости шумов при повторном нагружении (эффект Кайзера). Причиной возникновения АЭ Кайзер считал процессы скольжения дислокаций в деформируемом кристалле и взаимное трение поверхностей разрыва (трещины). Исследования, проведенные этим ученым, положили начало современному использованию метода акустической эмиссии.

Дальнейшее изучение явления АЭ при деформировании велось в направлении совершенствования аппаратуры с целью улавливания сигналов меньшей интенсивности. После Кайзера большой объем научно-исследовательских работ с целью выяснения физической природы АЭ был проведен в 1954 году в США под руководством Брэдфорда Х. Скофилда. По-видимому, именно Скофилд впервые для деформационных шумов ввел термин "акустическая эмиссия" («acoustic emission»). Работа коллектива началась с изучения корреляции АЭ с движением дислокаций при деформировании монокристаллов цинка, алюминия и золота. Последующие работы Скофилда были посвящены созданию методов оценки дефектности материала конструкций с использованием метода АЭ.

В 1960-х годах одновременно в нескольких странах было предложено использовать явление АЭ для неразрушающих испытаний различных конструкций. В 1961 году в США А. Грин, К. Локман и Р. Стил применили метод АЭ для оценки целостности корпусов ракетных двигателей. В 1963 году Х. Данеган предложил использовать АЭ для обследования сосудов давления. В это же время в СССР ряд научно-исследовательских институтов начали изучение явления акустической эмиссии и его применения для определения свойств различных материалов, обнаружения трещин, неразрушающего контроля конструкций. Активные исследования проводились во Всесоюзном научно-исследовательском институте неразрушающего контроля, Хабаровском филиале Всесоюзного научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений, в Московском инженерно-физическом институте, Ленинградском физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе АН СССР, Ленинградском политехническом институте, Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова, Институте сварки им. Патона Е. О. и других научно-исследовательских учреждениях. Было замечено, что при переходе материала объекта контроля к макроскопическому разрушению происходила смена закономерности изменения различных параметров АЭ: резкое увеличение активности АЭ, амплитуды и энергии импульсов, дисперсии распределения амплитуд импульсов и др.

История развития метода АЭ наиболее полно раскрывается из анализа подходов к решению *основной задачи АЭ диагностики* - определение связи параметров сигналов АЭ с характером процесса разрушения, степенью поврежденности материала, показателями надёжности и ресурса. Как и во всей диагностике, существует два основных подхода к решению данной задачи - *статистический и физический*. Первый из них заключается в построении статистических моделей АЭ на основе проведения большого количества испытаний. Второй предполагает создание физически обоснованных моделей параметров АЭ на основе различных моделей разрушения твердого тела, которые в свою очередь опираются на два основных подхода к понятию прочности: *механический и кинетический*. Совершенствование метода АЭ идёт по пути обобщения накапливаемой статистической информации, формулировки универсальных физических закономерностей, подбора ин-

формативных диагностических параметров и составления методик оценки ресурса объектов контроля.

Примером применения статистического подхода к определению степени поврежденности материала может служить использование статистических инвариантов, метода определения J-интеграла по данным АЭ испытаний, состоящий в сравнении полученного в опыте *эллипса рассеяния* значений параметров АЭ (в координатах «средняя частота – энергия») с имеющимися в базе (Бигус Г.А. и др.). Для идентификации источников АЭ используются 11 параметров (время подъема, число выбросов, энергия, длительность, амплитуда, число выбросов до максимума и их производные), создается система в виде искусственной нейронной сети, позволяющая разделять источники АЭ на 4 – 5 типов. Развивается анализ формы волны сигнала АЭ. Растет число работ, учитывающих спектральные характеристики сигналов АЭ при определении природы их источника. Для описания образования трещин и их развития используются также методы фрактального анализа и синергетический подход. Однако применение частотного анализа сигналов АЭ на практике затруднено из-за большой зависимости их спектрального состава от индивидуальных характеристик пьезоэлектрических ПАЭ и сложности сопоставления результатов измерений, полученных на различных акустических установках. Главным недостатком всех статистических методов является необходимость предварительного накопления большого объема информации, постановка и проведение снижающего неопределённость обучающего эксперимента (создание базы эллипсов рассеяния для различных типов трещин, стадий их развития и материалов, проведение нескольких сотен тренировок нейронной сети по распознаванию дефектов). Уменьшить необходимый объем статистических данных позволяет создание моделей параметров АЭ на основе информативных моделей разрушения твердого тела.

В рамках физического подхода к решению задач АЭ диагностики доминирует подход механический. В его основе лежит представление о твердом теле как о некоторой сплошной «конструкции», состоящей из частей, связанных силами сцепления. Если на межатомные связи воздействуют силы, превышающие силы сцепления, связи разрываются, тело либо разрушается, либо испытывает необратимую (пластическую) деформацию. На основании этого подхода рядом ученых, начиная с 1960-х годов, создаются математические модели излучения АЭ. При этом считается, что источниками АЭ являются процессы образования, движения и аннигиляции единичных дефектов кристаллической решетки, дислокаций, образование и развитие микротрещин, макроскопических дефектов в виде пор, раковин и трещин. В частности, конце 1970-х годов В. И. Ивановым была предложена следующую модель возникновения АЭ: "При нагружении твердого тела постепенно нарастают механические напряжения, в решетке накапливается потенциальная энергия. По достижении напряжениями предельных значений, равных прочности кристаллической решетки, атомные связи разрываются с импульсным выделением накопленной энергии в виде акустического излучения. Амплитуда излученного импульса будет зависеть от величины предварительно запасенной энергии, от распределения ее на образование новой поверхности и преобразование в акустическое излучение". Потребности повышения эффективности АЭ диагностирования привели к созданию нового подхода к интерпретации результатов регистрации сигналов АЭ, основанному на переходе от механических представлений о явлении АЭ к микромеханическим с применением кинетических закономерностей разрушения и упругого излучения (Носов В.В. и др.).

Активное применение метода АЭ в России привели к появлению разнообразных методик контроля и АЭ-диагностирования, в основе которых лежат устанавливаемые с позиций как статистического, так и физического подходов корреляции между параметрами АЭ и показателями надёжности. В 2014 году по АЭ введён новый ГОСТ Р 55045-2012, расширяющий понимание акустической эмиссии не только как эмиссии материала, связанной с перестройкой его структуры, а любого акустического излучения с поверхности объекта контроля. С другой стороны, произошла конкретизация критериальной оценки, поскольку из ряда рекомендуемых диагностических параметров для оценки состояния оставлен только локально-динамический показатель.

1.3. Современное состояние и перспективы развития метода акустической эмиссии.

На сегодняшний день метод акустической эмиссии выглядит весьма привлекательным с точки зрения контроля прочности, поскольку он высокочувствителен к трещинообразованию и позволяет связать его показатели с ресурсом. Наиболее широкое применение метод получил в нефтехимической и атомной отраслях промышленности, для Контроля авиационных и космических конструкций. Осуществляется длительный и периодический АЭ-контроль состояния сосудов, работающих под давлением, трубопроводов, подземных сооружений. Область применения АЭ контроля продолжает расширяться (подшипники, колёсные пары, металлургия, горное дело и пр), однако сдерживается сложностью интерпретации результатов АЭ-наблюдений, делающей вызов акустико-эмиссионному диагностированию. Оценка важности и степень решения основных проблем АЭ диагностики даны в табл.1.1. Как видно из таблицы, наиболее важными и, в то же время наименее решенными проблемами являются обработка АЭ сигнала, оценка источников

Таблица 1.1.

№	Проблема	Важность проблемы (от 0 до 1)	Степень решения проблемы, %
1	Модели источников АЭ	0,2 – 0,4	70 – 80
2	АЭ канал (искажение сигнала)	0,4 – 0,6	60 – 80
3	Преобразователи АЭ	0,8 – 1	50 – 70
4	АЭ оборудование	0,4 – 0,6	90 – 97
5	Шум и помехи	0,3 – 0,5	80 – 90
6	Обработка АЭ сигнала	0,8 – 1	10 – 30
7	Методика проведения контроля	0,3 – 0,5	90 – 97
8	Оценка источников, безопасность АЭ	0,8 – 1	10 – 30
9	Предсказание на основе АЭ (прогноз ресурса)	0,8 - 1	0 - 10

АЭ и предсказание на основе данных АЭ времени до разрушения контролируемого объекта. При всей перспективности метода, широким остаётся спектр промышленных объектов и оборудования, где метод АЭ ещё активно не применяется, в том числе и для осуществления процедуры экспертизы промышленной безопасности. К таким промышленным объектам относятся, в частности, грузоподъемные механизмы, буровое оборудование, системы добычи углеводородов. В Китае, например, выявлено более миллиона мостовых кранов, прошедших или требующих проведения АЭ диагностирования.

Причиной этого является отсутствие соответствующей потребностям методической базы, недостаточность статистики обнаружения дефектов, и как следствие, не очевидность результатов акустико-эмиссионной диагностики. Чаще всего интерпретация результатов АЭ наблюдений ведётся либо на основе статистического подхода, либо с позиций механики развития трещин, а «...в задачи экспертной организации, проводящей отдельный АЭ контроль, чаще всего входит получение ответа на вопрос, есть источники АЭ или нет и какова степень опасности этих источников. Речь даже не идет о дефектах, о степени поврежденности или работоспособности конструкции, не говоря о более сложных задачах, таких как оценка остаточного ресурса».

Решение перечисленных проблем невозможно без глубокого анализа методологии разработки систем диагностирования, физических основ разрушения и явления акустической эмиссии. Таким образом, анализ современного состояния и перспективы развития метода АЭ позволяет сформулировать следующие основные выводы:

1. Применение метода акустической эмиссии для целей диагностирования опирается на аппаратный и методический базисы. Первый заметно развивается, сопровождаемая повышением чувствительности, оцифровкой сигналов, компьютеризацией и автоматиза-

цией обработки первичной информации, второй более консервативен и в значительной степени отстаёт в темпах развития от первого. Явление АЭ и его сущность противопоставлены, что сдерживает разработку эффективных алгоритмов АЭ-диагностирования.

2. Основным методическим противоречием АЭ контроля является неопределённость в интерпретации результатов регистрации и связи параметров АЭ с критериями работоспособности, несоответствие конкретной формы предоставления сведений о сигналах АЭ их абстрагированному содержанию.

3. Устранение противоречия должно проводиться методологически строго на основе системного подхода. Разработка алгоритмов обработки результатов АЭ регистрации должна опираться на последовательное построение логически связанных иерархически подчинённых информативных моделей процессов и явлений, определяющих работоспособность объекта контроля и значения параметров АЭ. Регистрируемая измерительная АЭ информация должна рассматриваться как фрагмент решения общей информационной задачи диагностирования и использоваться для оценки адекватности моделей и определения их параметров.

Решение проблемы оценки ресурса на основе метода АЭ сводится к комплексной формулировке социально-экономических аспектов обеспечения надёжности опасных технических объектов на стадии их эксплуатации, выделению прочности как основного критерия их работоспособности, моделированию процесса накопления повреждений, лимитируемого её критическим значением и прогнозированию момента этого накопления на основе наблюдения за повреждением с помощью явления АЭ. Это требует конкретизации элементарного акта этого процесса, количественного описания процесса на основе использования универсальных кинетических закономерностей и физических констант, формулировки условия завершения процесса и критериев подобия процесса разрушения и явления АЭ, правил проведения АЭ контроля и выбора информативных параметров АЭ, устранения противоречия между используемым в АЭ-контроле понятием «активности источника», абстрагированным от работоспособности объекта, и степенью его опасности. Это позволит повысить точность оценки прочности и ресурса, расширить номенклатуру объектов контроля, оптимизировать диагностические, изготовительные и ремонтные технологии.

2. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ СИСТЕМА И СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ АЭ

2.1. Измерительная акустико-эмиссионная система

Для регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ) и обработки информации, полученной от объекта контроля, используются различные измерительные акустико-эмиссионные системы (ИАЭС) (рис.6.1). Блок-схема системы изображена на рис. 6.2. Регистрация акустической эмиссии происходит следующим образом – акустические волны распространяются от источника к датчику (одному или нескольким), где они преобразуются в электрические сигналы и далее через аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) обрабатываются средствами вычислительной техники. Кратко опишем структуру информационной системы. На данный момент в ней выделяются три модуля. Первый модуль предназначен для получения потока импульсов с выхода платы АЦП в, практически реальном времени. В нём задаются характеристики работы платы АЦП, и базовые параметры ожидаемого импульсного потока – нулевой уровень сигнала, величина минимального отклонения. Вторым модулем служит для анализа потока импульсов и предназначен для работы как с данными, поступающими в реальном времени, так и с сохранёнными данными (режим пост-обработки). В этом модуле происходит выделение из импульсного потока отдельных сигналов акустической эмиссии и расчёт их базовых характеристик. Так же в информационной системе реализована возможность импорта полученных данных во внешние программы для дальнейшего анализа средствами стандартных математических пакетов.

Возникающие микротрещины излучают при образовании ультразвуковые волны, которые имеют форму затухающей синусоиды (рис. 6.3 а). Такая волна доходит до датчика

АЭ, представляющего собой пьезокерамическую таблетку цирконата-титоната свинца ЦТС-19, помещенную в латунный корпус (рис. 6.2 б), и преобразуется в электрический сигнал. Преобразование упругой волны в электрический сигнал осуществляется за счет пьезометрического эффекта, заключающегося в появлении электрических зарядов противоположных знаков на гранях пьезокристаллов при их механическом деформировании. Для улучшения акустического контакта датчика с образцом он предварительно должен смазываться маслом. С датчика сигнал поступает на предварительный усилитель 3, функция которого заключается в согласовании высокого выходного сопротивления датчика с кабелем связи, а также в предварительном усилении с целью улучшения соотношения сигнал-шум.

После дополнительного усиления основным усилителем сигнал поступает в блок обработки сигналов (БОС) 5, где из сигнала сложной формы выделяется сигнал, амплитуда которого пропорциональна максимальной амплитуде огибающей сигнала (рис. 6.3 б). После окончания работы всю накопленную информацию можно наблюдать на экране 7.

Расширенный частотный диапазон регистрируемых сигналов составляет 20-1000 кГц, эффективное значение напряжений собственных шумов усилительного тракта, приведенное ко входу предварительного усилителя не более 5 мкВ, точность определения времени прихода сигнала АЭ 0,8 мкс, программируемый коэффициент усиления основного усилителя задавался в пределах от минус 20 до 40 дБ а предварительное усиление 34 дБ, диапазон измерения максимальной амплитуды сигнала от 20 до 134 дБ с точностью ± 1 дБ, максимальное количество регистрируемых каждым каналом за одну секунду сигналов АЭ 1500. Нижний уровень порога дискриминации системы определялся необходимостью устранения электромагнитных помех и составлял 47 дБ на каждом канале, время блокировки составляло 48000 мкс, что позволяло регистрировать

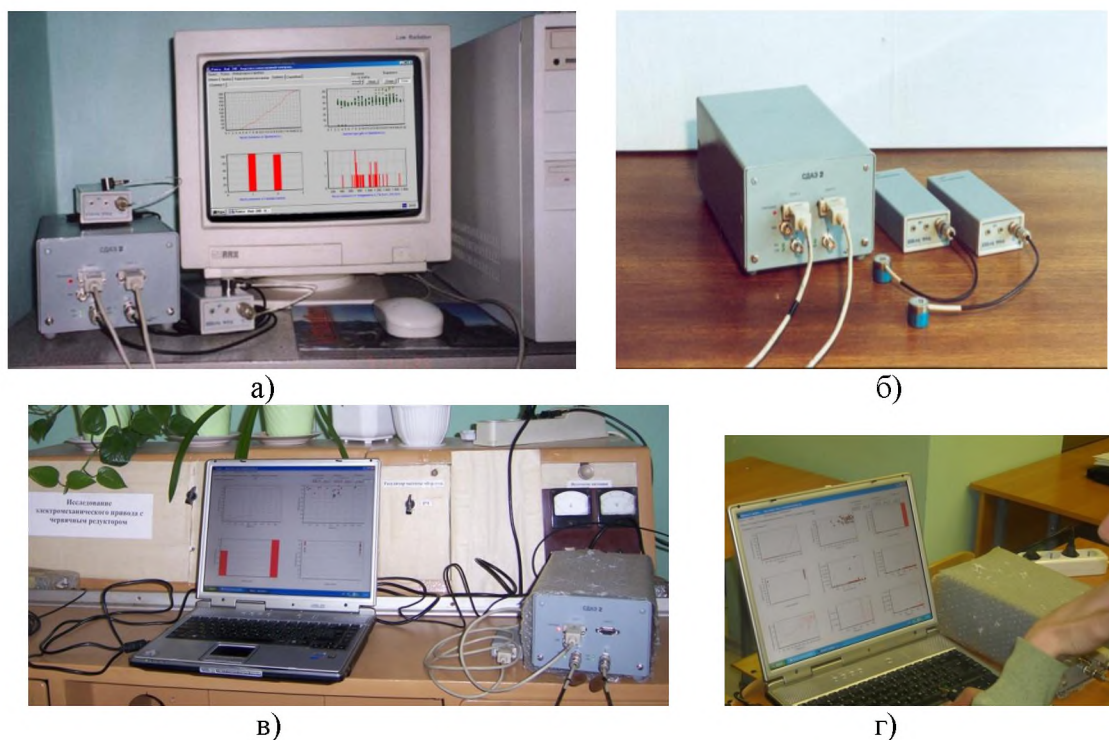


Рис.6.1. Внешний вид учебной двухканальной измерительной акустико-эмиссионной системы. а, в- система в сборе с персональным компьютером, б- блок обработки сигналов, предварительные усилители и преобразователи АЭ, г-наблюдение за результатами регистрации АЭ в реальном масштабе времени.

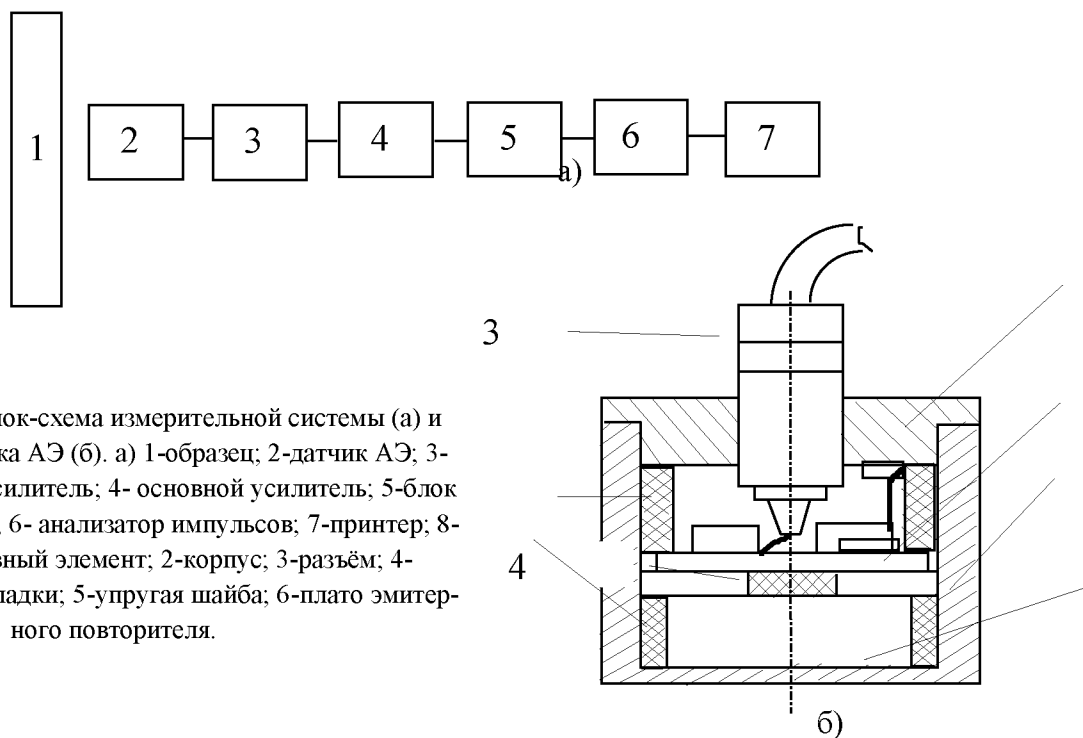


Рис.6.2. Блок-схема измерительной системы (а) и конструкция датчика АЭ (б). а) 1-образец; 2-датчик АЭ; 3-предварительный усилитель; 4- основной усилитель; 5-блок обработки сигналов; 6- анализатор импульсов; 7-принтер; 8-ЭВМ; б) 1-активный элемент; 2-корпус; 3-разъём; 4-изоляционные прокладки; 5-упругая шайба; 6-плата эмитерного повторителя.

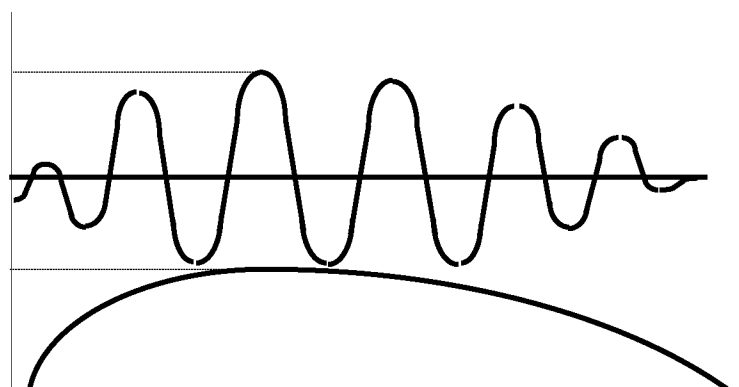


Рис. 6.3. К пояснению принципа обработки сигналов АЭ.

микротрещины размером более 100 мкм. Упругая волна регистрировалась пьезоэлектрическими приёмниками АЭ, сигналы из которых усиливались предварительным усилителем и поступали на блок анализа. Отсюда ряд цифровых параметров, характеризующих поступающие из предварительного усилителя сигналы, передавались по интерфейсу CAN2.OB в компьютере. Активный элемент приёмников АЭ с частотным диапазоном 20-200 кГц изготавливался из пьезокерамики ЦТС-19.

При помощи двухканальных измерений в образце могут быть определены координаты образующихся микротрещин. Блок-схема двухканальной измерительной системы изображена на рис. 6.4, а принцип её работы заключался в следующем. Упругая волна, распространяющаяся от источника АЭ, последовательно возбуждает расположенные на поверхности образца пьезопреобразователи. Сигнал, возникающий на преобразователях при каждом акте излучения, проходит через усилители и поступает в блоки 4,5 обработки и управления сигналами, к функциям которых при этом добавляется операция измерения временных интервалов между сигналами, воспринятыми каждым из каналов в отдельности.

Сигнал, воспринимаемый системой первым, запускает временной отсчёт в другом канале, который продолжается до тех пор, пока на него не придёт этот же сигнал. Если за время максимально возможного ожидания $t=B/v$, определяемое наибольшим расстоянием B между преобразователями и скоростью v распространения звука, хотя бы один из оставшихся сигналов группы не придёт, производится общий сброс временного отсчёта и сигнал не регистрируется. В противном случае по разности времён прихода сигнала АЭ на датчики различных каналов при помощи компьютера определяется координата источника АЭ.

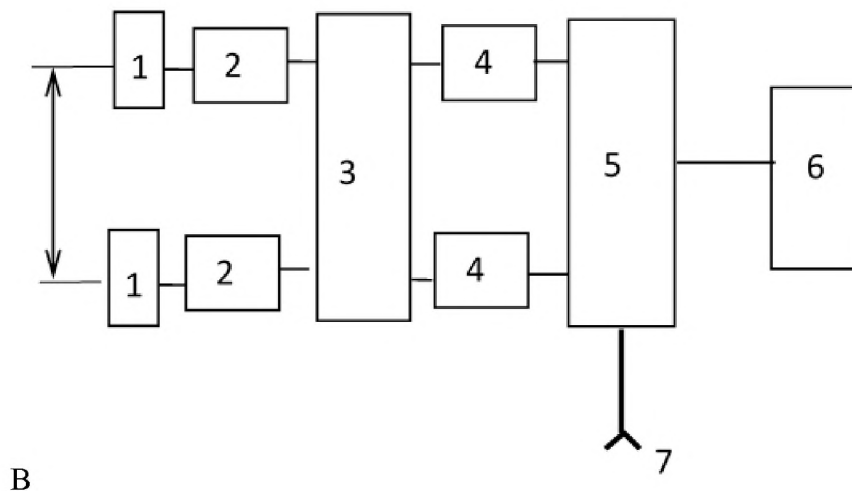
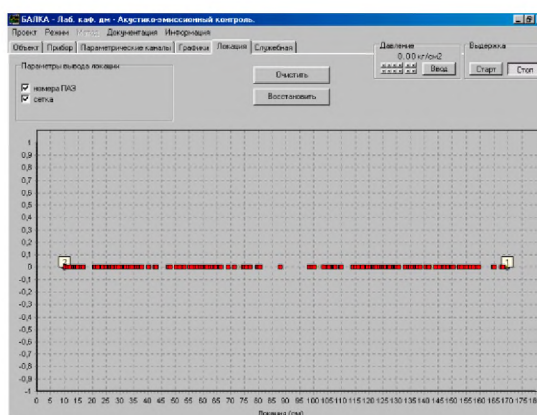
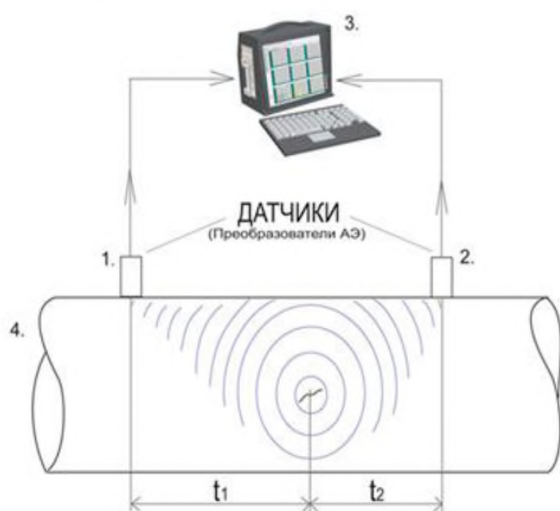


Рис. 6.4. Блок-схема двухканальной измерительной системы АЭ. 1-датчики АЭ; 2-предварительные усилители; 3-блоки регулирования усиления; 4-блок обработки сигналов АЭ; 5- блоки управления, 6- - компьютер; 7-вход внешнего параметра.

По зарегистрированному времени прихода сигнала t_i на i -й приемник (датчик) системой определяется разность времени прихода T ($T= t_2 - t_1$) на разнесенные приемники (рис.6.5) Затем по известной скорости звука в материале и известным координатам приемников программой вычисляются координаты источника (дефекта).

Схемы расположения датчиков могут быть различными (рис. 6.6). Программное обеспечение (ПО) измерительной акустико-эмиссионной системы разделено на четыре взаимодействующие между собой части. Это обусловлено как конструктивными особенностями системы, так и условиями, накладываемыми операционной системой на функционирование программного обеспечения.



а) б)

Рис. 6.5. Принцип определения координаты источника АЭ (а) и изображение результатов локации на дисплее компьютера (б). 1 - преобразователь АЭ (приемник 1); 2 – преобразователь АЭ (приемник 2); 3 – центральный блок сбора и обработки на базе промышленного компьютера; 4 – объект контроля; t_1 – время прихода сигнала на первый приемник; t_2 – время прихода сигнала на второй приемник.

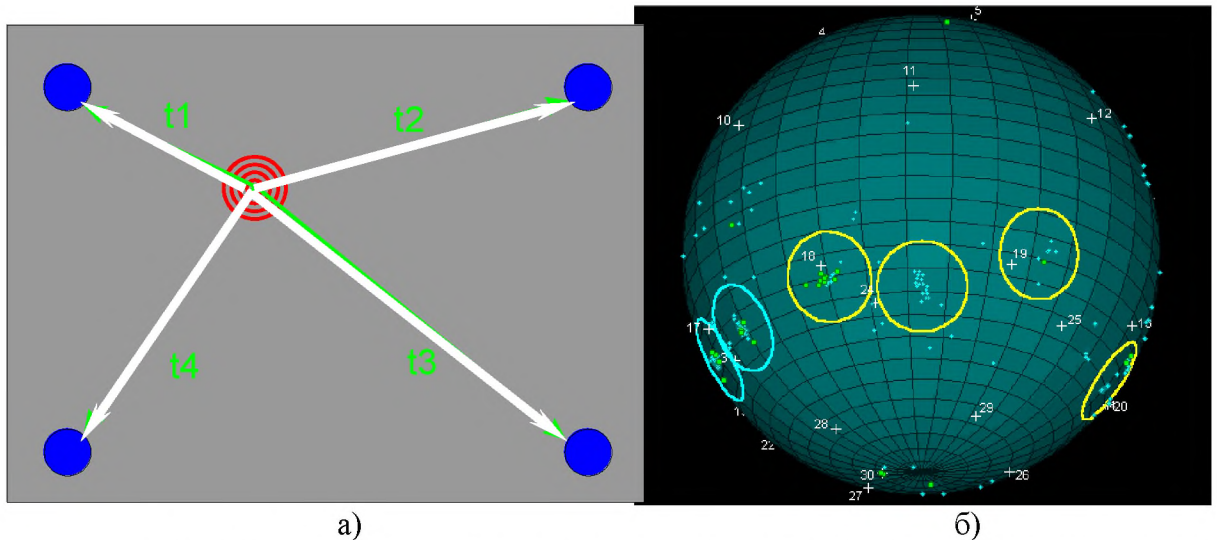


Рис. 6.6. Локация источников сигнала АЭ на поверхности (а) и пример вывода результата сферической АЭ - локации шарового резервуара диаметром 30м (б)

Схема обработки информационного потока поступающего от предусилителей датчиков, регистрирующих сигналы АЭ, изображена на рисунке 6.7 а. Аналоговая информация (1), поступающая в основной модуль прибора от предусилителей обрабатывается программой (2), загруженной во FLASH память этого модуля. Эта программа преобразует аналоговую информацию в цифровой поток (3), который поступает в компьютер по высокоскоростной линии связи. Этот канал связи предоставляет возможность обмена информацией со скоростью до 1 Мбит/с. Работа с каналом обеспечивается полностью программируемым контроллером M167-1, встроенным в компьютер. Данная плата, спроектированная на базе 16-ти разрядных микроконтроллеров фирмы Siemens (Infineon) C167 и STMicroelectronics (Thomson) ST10R167, предназначена для построения промышленных цифровых систем реального времени. Взаимодействие прикладной программы с контроллером обеспечивает драйвер (4) этого устройства. Он представляет собой программу, обладающую набором функций, для изменения настроек контроллера и получения приходящих по каналу данных. Результаты (5), возвращаемые драйвером, обрабатываются прикладной программой (6) в реальном времени. После окончания испытаний программа создает выходные файлы, в которых сохраняется, вся информация (7), полученная от основного модуля системы. Эти файлы используются для дальнейшей обработки с помощью программ, реализующих альтернативные методы анализа (8). Выходные данные (9) этих программ сохраняются в файлах (10), используемых в дальнейшем для построения отчетов.

Диаграмма взаимодействия, описанных выше частей программного обеспечения, изображена на рисунке 6.7 б. Рассмотрим механизм взаимодействия частей ПО более подробно. Программа предварительной обработки (2), физически размещенная в памяти основного модуля (блока анализа) измерительной системы передает цифровую информацию в компьютер, взаимодействуя, таким образом, с драйвером (4). Программа (2), в свою очередь, может настраиваться прикладной программой (6) используя драйвер (4), как промежуточный программный слой при передаче команд. Взаимодействие драйвера и прикладной программы осуществляется при возвращении в прикладную программу (6) информации от контроллера.

Прямое взаимодействие прикладной программы (6) и программ постобработки (8) не предусмотрено. Возможна только передача данных в одном направлении через промежуточный файл. Программа 2 реализует основную функциональность блока анализа системы – на основании первичных измеряемых параметров АЭ: время прихода сигнала АЭ с начала испытания; время нарастания сигнала АЭ; Длительность сигнала АЭ; Число вы-

бросов сигнала АЭ; Амплитуда импульса АЭ; Энергия импульса АЭ. Программа определяет: момент регистрации сигнала с точностью 0,8 мкс; момент окончания сигнала АЭ с точностью 0,8 мкс; момент максимума огибающей сигнала АЭ с точностью 0,8 мкс;

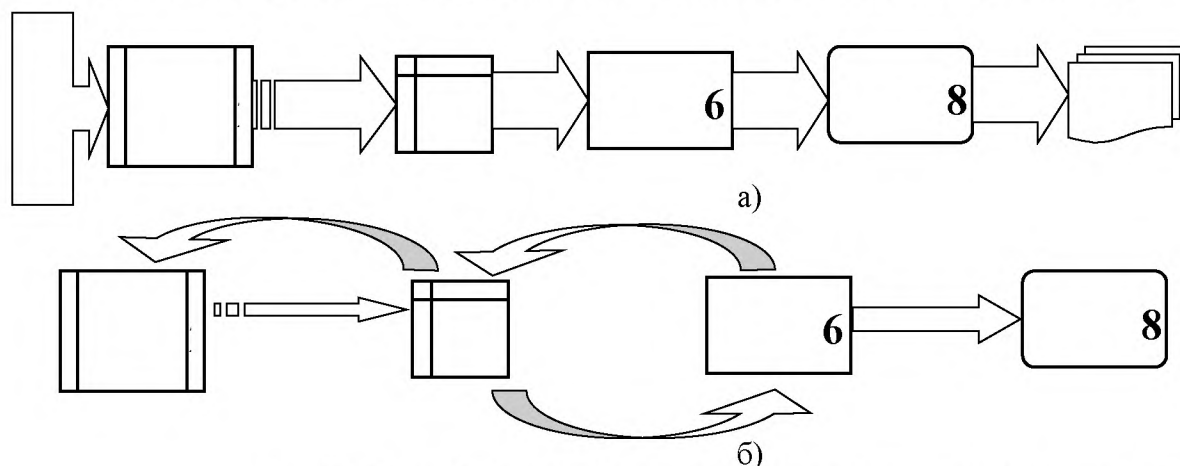


Рис.6.7. Схема обработки информационного потока (а) и диаграмма взаимодействия частей ПО (б)

максимальную амплитуду огибающей сигнала АЭ с точностью 2%; выделяет огибающую сигнала; осуществляет фильтрацию сигнала АЭ от низкочастотных помех, вызванных вибрацией контролируемого объекта при работе. Драйвер программируемого контроллера М167-1 позволяет изменять отдельно для каждого канала такие параметры системы, как коэффициент передачи (дБ); уровень порога дискриминации (дБ); время блокировки канала (мкс).

Прикладная часть программного обеспечения (6,8) системы служит для сохранения и визуализации полученных от блока анализа результатов. Программа 6 представляет собой средство, предназначенное для работы в режиме реального времени. Основными функциями этой программы являются: удобная настройка прибора; сбор и сохранение АЭ информации, полученной от блока анализа системы; числовое представление на экране полученных данных; построение графиков зависимостей различных регистрируемых и расчетных характеристик; определение линейной координаты источника сигнала.

Во время испытания в реальном масштабе времени строятся графики (рис.6.8), количество и отображаемые зависимости которых легко настраиваются. Графики можно просмотреть, переключая страницы. Все результаты работы программы сохраняются в файлах различных форматов. Таких как файл данных ASCII; файл данных Excel; бинарный файл данных. Получаемая информация выводится на экран монитора и печать в цифровом виде (табл. 6.1) и приемлема для дальнейшей компьютерной обработки при любом режиме нагружения и для любого объекта контроля. После завершения работы программы (6) полученные файлы с данными можно обрабатывать другими программами (8) такими как, например MS Excel. Это позволяет применять альтернативные методики обработки, не предусмотренные программой 6.

Важным элементом настройки АЭ системы перед проведением контроля является калибровка АЭ преобразователей. Калибровка выполняется посредством создания в диагностируемой конструкции сигнала, имитирующего АЭ-импульс, по каждому рабочему каналу. В качестве имитатора может быть использован АЭ-датчик с подачей на него синусоидального сигнала либо импульсного сигнала, создаваемого аппаратурой, сигнала от источника Су-Нельсона, либо легким постукиванием металлическим предметом.

При калибровке АЭ датчик-имитатор устанавливается вблизи (0,1 м) от приемного АЭ-датчика, а также на расстоянии 1 м. При этом амплитуда принятого АЭ-сигнала должна быть максимальной; наиболее удобно это контролировать с помощью электронно-лучевого осциллографа. Прохождение АЭ-сигнала по конструкции проверяется установкой имитатора в различных ее местах. При этом следует обратить внимание на места концентрации, где имеются внутренние мембраны, разъемные соединения, стыковка листов и

т.п. В случае если контролируемая зона содержит также участки, где АЭ-сигналы искажаются, то целесообразно разделить всю зону на части. Правильность установки параметров контролируемой зоны проверяется установкой имитатора вне контролируемой зоны, тогда при работе аппаратуры в режиме локализации АЭ-сигнал не должен фиксироваться аппаратурой. Результаты калибровки фиксируются в Акте

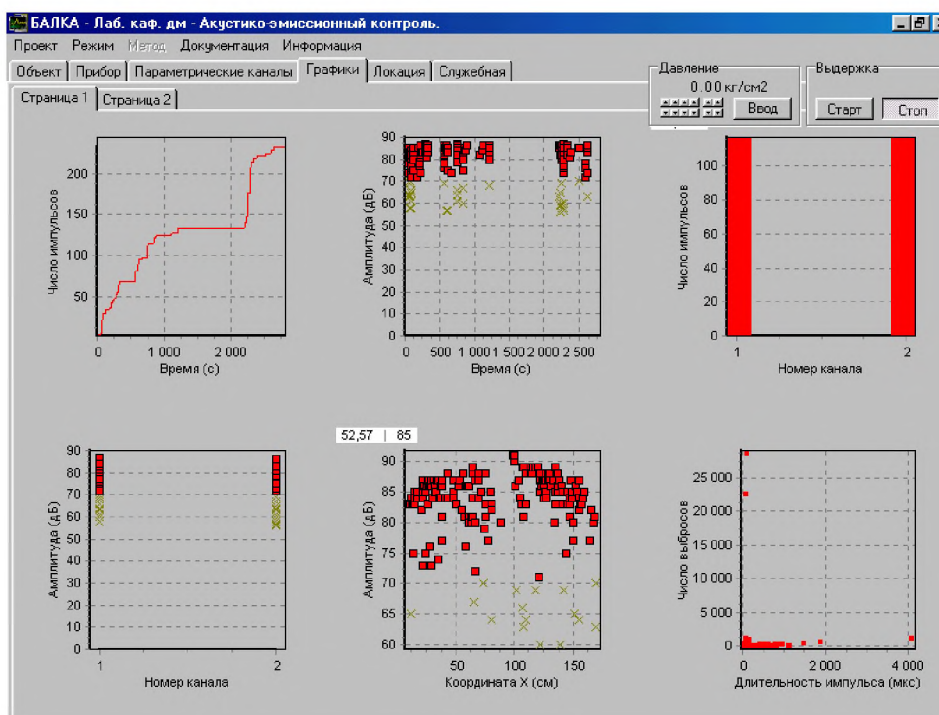


Рис.6.8. Отображение АЭ-информации в реальном масштабе времени

Таблица 6.1

Предоставление информации в численном виде

Время (с)	Номер	Канал	Амплитуда АЦП	Амплитуда (дБ)	Энергия (мВ ² хмс)	РВП (мкс)	Максимум (мкс)	Длительность (мкс)	Число выбросов
5	1	1	635	81	1007	0	122	168	13
5	1	2	138	66	43	20	52	152	47
5	2	2	19	49	0	0	41	60	59
5	3	1	121	67	77	0	0	356	11

2.2. Определение координаты источника АЭ, скорости прохождения и коэффициента затухания упругой волны в материале

1 Координата источника АЭ определяется по разнице времён прихода (РВП) упругой волны на преобразователи АЭ и определяется автоматически измерительной системой (рис. 6.9.).

2. На балке с преобразователями, установленными на расстоянии L друг от друга, методом Су-Нильсена (облом карандаша) моделируем источник сигнала АЭ на расстоянии 10-20 см от одного из датчиков со стороны, противоположной расположению второго датчика

3. По колонке “РВП” Табл. 6. 1 определяем разницу времён прихода (РВП) сигнала на преобразователи

4. Определяем скорость упругой волны путём деления расстояния L между датчиками на РВП

5. П.1 повторяем в непосредственной близости от одного из преобразователей АЭ

6. Коэффициент затухания сигнала определяем, как отношение разницы амплитуд сигнала, зарегистрированного разными каналами, на расстояние L между датчиками.

Определение координаты X источника АЭ на основе разницы времён прихода (РВП) сигнала

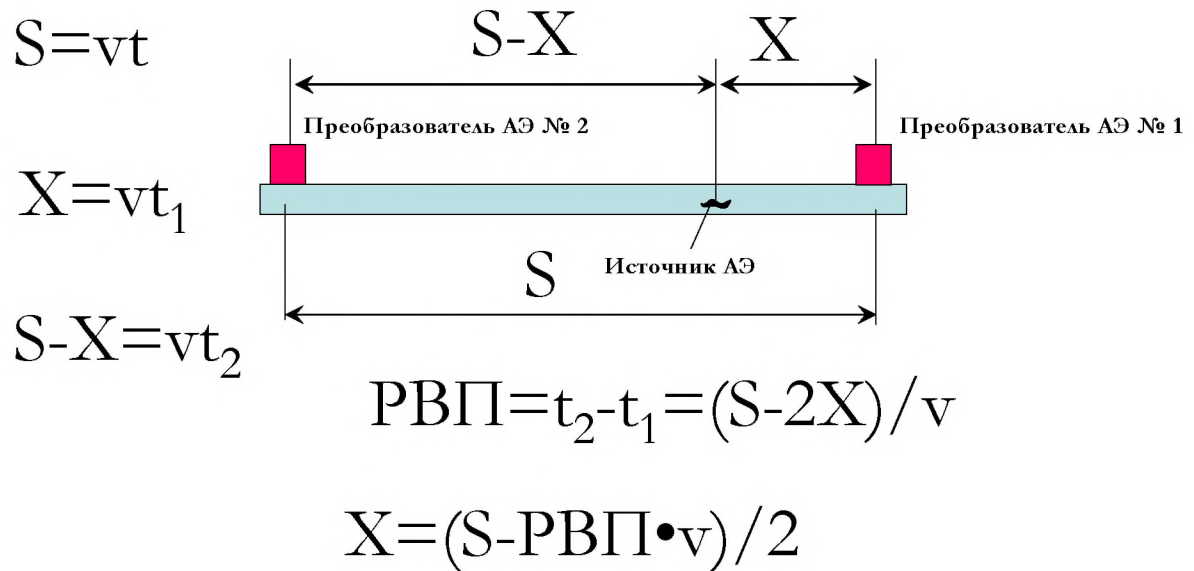


Рис. 6.9. Определение координаты источника АЭ на основе разницы времён прихода сигнала

3. Задание: 1. Описать метод акустической эмиссии и принцип действия измерительной системы АЭ

2. Вывести формулы расчёта координаты источника АЭ через РВП и разницу амплитуд сигнала

3. На основе полученных данных экспериментов рассчитать коэффициент затухания и скорость распространения сигнала по образцу

3. АЭ ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Объектами контроля и диагностики акустико-эмиссионного метода диагностирования на основе предложенных концентрационно-кинетических показателей прочности могут быть разнообразные изделия, критерием работоспособности которых является прочность и от которых могут быть зарегистрированы сигналы АЭ в процессе корректно проведённого испытания. В данном разделе рассмотрим примеры диагностирования сосудов давления, металлоконструкций подъёмно-транспортных машин, металлургических слябов в процессе их технологической подготовки к прокатке, изделий из композиционных материалов, горных пород.

3.1. АЭ-диагностика сосудов, работающих под давлением.

Из всего многообразия элементов сложных технических объектов наиболее вероятно и экологически неблагоприятно разрушение сосудов, выполняющих роль резервуаров, корпусов, трубопроводов объектов атомной энергетики, химической, нефте- и газодобывающей, судостроительной промышленности, авиационной и космической техники. По статистическим данным 14 % отказов оборудования атомных электростанций (АЭС) происходит из-за разрушения трубопроводов. Наиболее типичными дефектами тонкостенных сварных сосудов являются дефекты сварки (62 % от общего числа дефектов и повреждений сосудов), локальные коррозионные повреждения (13%), вмятины монтажного проис-

хождения (11%), задиры металла (6%), смещения кромок (4%), коррозионно-усталостные и усталостные трещины (1%), прижоги. Число дефектов и повреждений возрастает с увеличением срока эксплуатации сосудов. Остаточный ресурс резервуаров, работающих в условиях статического нагружения и активных коррозионно-эрозионных процессов, определяют по скорости коррозии, а резервуаров, используемых в условиях малоциклового нагружения, когда основной повреждающий фактор - малоцикловая усталость, устанавливают по ГОСТ 25859-83. Особенность перечисленных дефектов - в их скрытости как по расположению, так и по степени опасности, которая не устраняется стандартными расчётными методами.

Диагностика сосудов производится в соответствии с “Правилами устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением”, “Методическим указаниям по определению остаточного ресурса потенциально опасных объектов, подконтрольных Госгортехнадзору России”. Техническое диагностирование сосудов следует проводить после истечения назначенного (расчётного) срока эксплуатации, после аварии или восстановительного ремонта. Назначенный (расчётный) срок эксплуатации сосуда устанавливается предприятием-изготовителем и должен быть указан в паспорте сосуда. При отсутствии в паспорте расчётного (назначенного) ресурса сроки технического диагностирования назначаются в соответствии с инструкциями по данному виду сосуда (первичный срок диагностирования, например, для баллонов 14-25 лет, вторичное диагностирование – через 3-5 лет)

Техническое диагностирование сосудов, работающих под давлением, включает:

- наружный и внутренний визуальные осмотры;
- контроль геометрических размеров (внутреннего или наружного диаметра, толщины стенки, смещение кромок стыкуемых элементов и т.п.);
- измерение выявленных дефектов (коррозионных язв или эрозионных повреждений, трещин, деформаций и других);
- контроль сплошности сварных соединений и зон основного металла неразрушающими методами дефектоскопии;
- контроль толщины стенки неразрушающими методами;
- измерение твёрдости с помощью переносных приборов;
- лабораторные исследования (при необходимости) химического состава, свойств и структуры материала основных элементов;
- гидравлические или пневматические испытания;
- прогнозирование на основании результатов технического диагностирования и расчётов на прочность возможности допустимых рабочих параметров, условий и сроков дальнейшей эксплуатации (ресурса) сосуда.

Оценка технического состояния сосуда должна осуществляться по параметрам, обеспечивающим его надёжную и безопасную эксплуатацию согласно нормативной или конструкторской документации. Прогнозирование остаточного ресурса осуществляется согласно закономерностям изменения определяющих параметров, полученных при анализе повреждений или в результате измерения функциональных показателей, изменение которых может привести сосуд в неработоспособное или предельное состояние.

В зависимости от критериев предельного состояния (критериев работоспособности) и условий эксплуатации сосудов параметрами его технического состояния могут служить:

- характеристики материалов (предел текучести, временное сопротивление, трещиностойкость, предел выносливости, структура, химический состав и др.);
- коэффициенты запасов прочности и ресурс (по пределу текучести, временному сопротивлению, циклической прочности и др.);
- технологические параметры (температура, давление, параметры циклической нагрузки, вибрации);
- результаты гидравлических или пневматических испытаний (выдерживаемое давление, выявленные течи, факты сброса давления и др.).

Организация работ по техническому диагностированию возлагается на предприятие-владельца сосуда, а работы по техническому диагностированию проводятся организация-

ми, имеющими разрешение (лицензию) органов Госгортехнадзора России на выполнение работ. Диагностирование проводится по типовой программе, включающей различные виды контроля и расчёта сосуда. Применение акустико-эмиссионного диагностирования наиболее актуально при проведении пневмоиспытаний, поскольку при этом виде нагружения появление и развитие опасного дефекта не приводит к сбросу давления и не контролируется соответствующими приборами давления, как при гидравлических испытаниях. Обеспечение безопасности испытаний производится по результатам наблюдения за АЭ в реальном масштабе времени. Результаты всех проводимых исследований должны оформляться в виде заключений, в которых даются рекомендации по допустимым параметрам, срокам дальнейшей эксплуатации, замене или ремонту сосуда. Срок дальнейшей эксплуатации не должен превышать нормативной (например, для баллонов 8 лет).

Рассмотрим пример акустико-эмиссионного диагностирования состояния абсорбера очистки углеводородного газа. Объектом контроля являлась колонна установки гидроочистки – абсорбер аминной очистки углеводородного газа с диаметром внутренним 1000 мм, высотой корпуса 16050 мм, емкостью 13,6 м³, толщиной стенки – 12 мм, выполненный из материала ВСтЗ. Обычное рабочее давление во время эксплуатации составляло 0,5 МПа. Для регистрации АЭ использовалась многоканальная АЭ система LOCAN AT (Physical Acoustics Corporation, США). Полный коэффициент усиления составлял 40+23 дБ, порог дискриминации составлял 45 дБ.

После локализации участка контроля, проведённой в предварительных испытаниях, в процессе гидронагружения колонны производилось повышение давления до уровня 0,65 МПа, выдержка при этом давлении в течение 5 мин, подъём давления до 0,81 МПа, выдержка. На высокую вероятность развития дефекта указывал экспертам характер АЭ активности, регистрируемой в ходе нагружения, в результате чего в локализованной зоне абсорбер был подвергнут тщательному визуальному обследованию, выявившему в ней более 10 опасных трещин. Характер расположения трещин – по окружности, в сечениях, совпадающих с участками приварки крепления тарелок колонны. Обработка результатов испытаний (рис.7.1) по предложенной методике позволяет определить АЭ-показатель состояния

$$Y_{AE} = \ln \xi / d\sigma = (\ln 5 - \ln 2) 12 / (0,81 - 0,65) 500 = 0,137 \text{ МПа}^{-1},$$

где значение ξ , в данном случае, принималось равным числу сигналов, зарегистрированных за единицу времени после снижения их амплитуды до минимального значения (150 секунд выдержки при постоянном давлении), напряжение σ рассчитывалось по формуле Лапласа

$$\sigma = Pd / (2\delta),$$

где P - давление, d-внутренний диаметр абсорбера, δ - толщина его стенки. В качестве информативного параметра ξ использовалась как активность, так и суммарная амплитуда сигналов АЭ. Расчётные значения Y_{AE} при этом варьировали в пределах 0,09-0,14 МПа⁻¹. Для оценки Y_{AE} использовался также участок равномерного нагружения в диапазоне 660-760 секунд (см. рис.7.1, табл. 7.1). Расчётные значения Y_{AE} при этом варьировали в пределах 0,05-0,08 МПа⁻¹. Таким образом, рассчитанные значения Y_{AE} превышали предельно допустимые $Y_R = 0,01 \text{ МПа}^{-1}$, что свидетельствовало об опасном состоянии абсорбера.

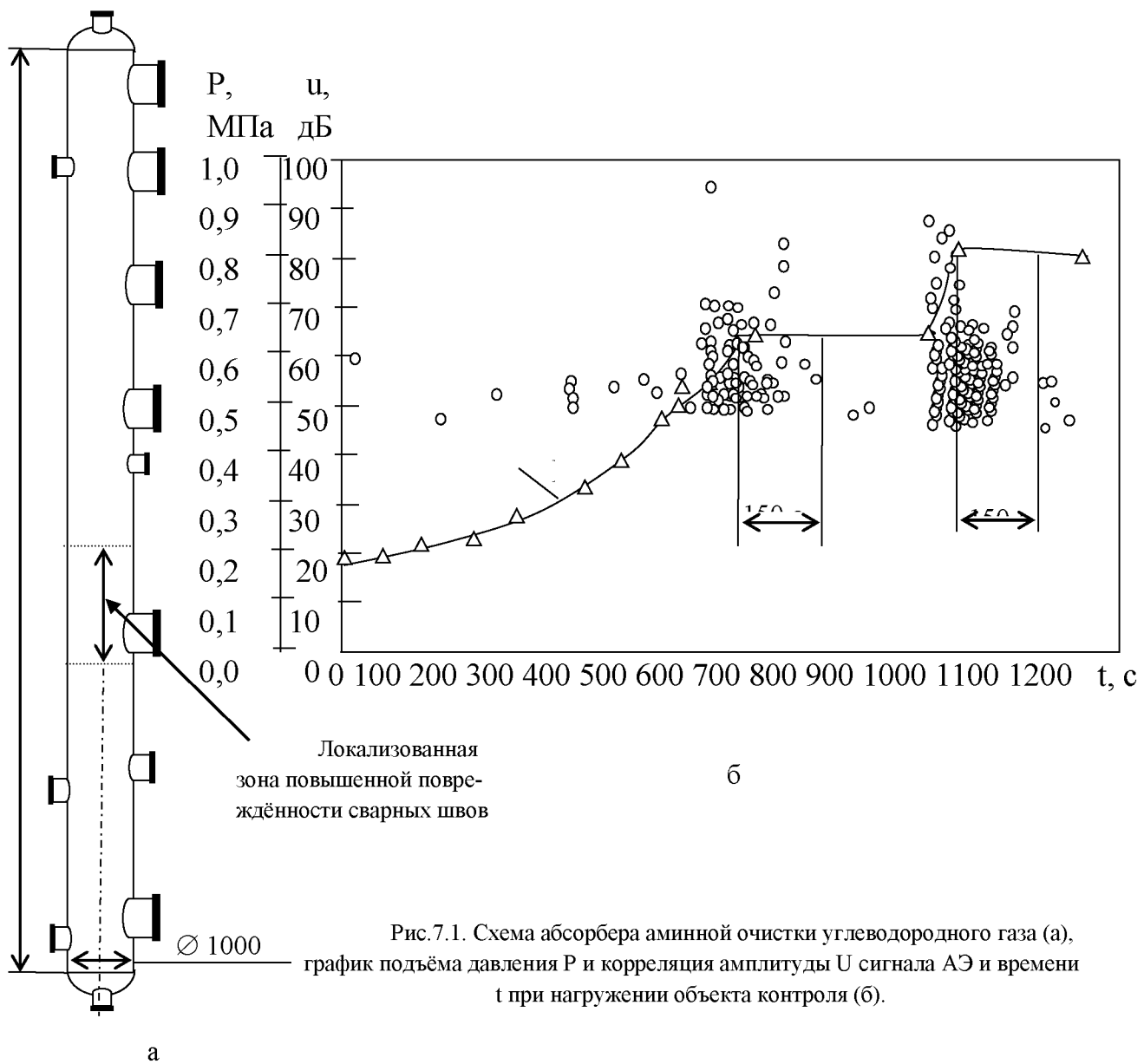


Рис.7.1. Схема абсорбера аминной очистки углеводородного газа (а), график подъёма давления P и корреляция амплитуды U сигнала АЭ и времени t при нагружении объекта контроля (б).

Таблица 7.1

Данные АЭ-испытаний абсорбера на этапе равномерного нагружения

Параметры АЭ-испытаний информативные параметры ξ и формулы расчёта Y_{AE}	Уровни напряжений		
	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
Временные интервалы, с	660-700	700-740	740-760
Средние номинальные напряжения, МПа	22,92	25	27,8
Средняя активность N_{Σ}' , имп/с	1,475	1,75	1,95
Средняя амплитуда U_{CP} , дБ	51,91525	54,4	55,13953
Расчёт Y_{AE} по двум уровням напряжений и $N_{\Sigma}'U_{CP}$ без учета амплитудного распределения, МПа ⁻¹	$Y_{AE}(2,1)$	$Y_{AE}(3,2)$	$Y_{AE}(3,1)$
	0,104668	0,04347	0,069554
Расчёт Y_{AE} по двум уровням напряжений и $N_{\Sigma}'U_{CP}$ с учетом амплитудного распределения, МПа ⁻¹	$Y_{AE}(2,1)$	$Y_{AE}(3,2)$	$Y_{AE}(3,1)$
	0,069105	0,03705	0,047706
Расчёт Y_{AE} по двум уровням напряжений и N_{Σ}' без учета амплитудного распределения, МПа ⁻¹	$Y_{AE}(2,1)$	$Y_{AE}(3,2)$	$Y_{AE}(3,1)$
	0,082191	0,038648	0,057207
Расчёт Y_{AE} по двум уровням напряжений и N_{Σ}' с учетом амплитудного распределения, МПа ⁻¹	$Y_{AE}(2,1)$	$Y_{AE}(3,2)$	$Y_{AE}(3,1)$
	0,069105	0,032227	0,035359

Рассмотрим представленные на рис.7.2 результаты испытаний стального цилиндрического сосуда диаметром 660 мм, высотой 1500 мм и толщиной стенки 6 мм. Распределение источников АЭ геометрически обрисовывало на поверхности сосуда разрушающийся сварной шов приварки прямоугольной пластины, а визуальная оценка установила прогрессирующее разрушение бандажного кольца.

Регистрация суммы амплитуд АЭ-событий в кластере для интервалов подъёма и выдержки нагрузки позволяла рассчитать значение показателя Y_{AE} . При использовании второго и третьего интервалов выдержки

$$Y_{AE(2-3)} = \text{dln } N_{\Sigma}U_{CP} / d\sigma = (\ln 2 - \ln 1) / 6 / [(9,5 - 8,5) \cdot 10^{-1} \cdot 330] = 0,126 \text{ МПа}^{-1},$$

При использовании третьего и четвертого интервалов выдержки

$$Y_{AE(3-4)} = \text{dln } N_{\Sigma}U_{CP} / d\sigma = (\ln 8 - \ln 2) / 6 / [(11,5 - 9,5) \cdot 10^{-1} \cdot 330] = 0,127 \text{ МПа}^{-1}.$$

Таким образом, полученные значения показателя Y_{AE} существенно (более чем в 10 раз) выше предельно допустимых ($0,01 \text{ МПа}^{-1}$) и обязывают отнести источник АЭ к катастрофически активному, состояние признать неработоспособным.

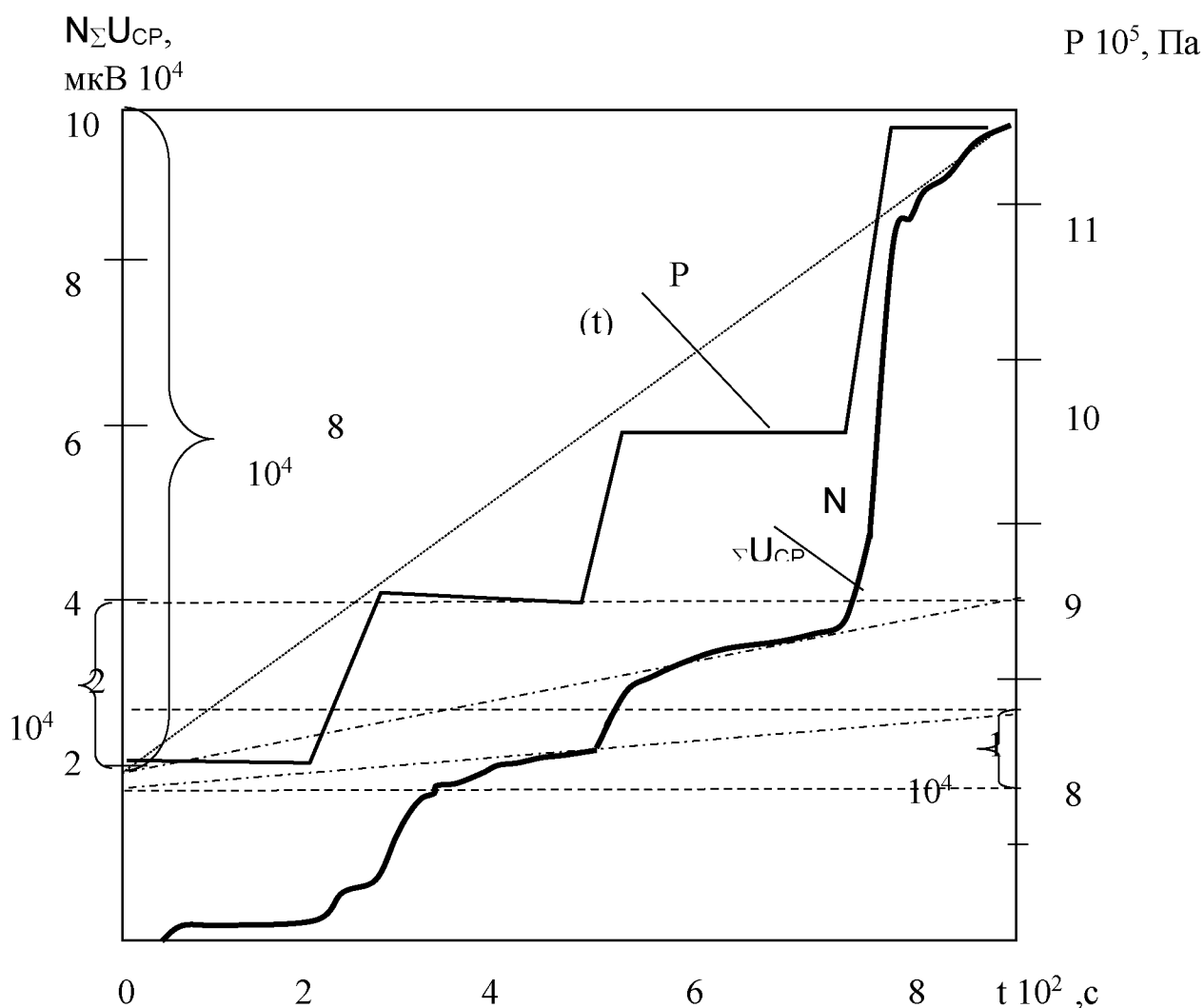


Рис.7.2. Динамика суммы амплитуд АЭ-событий $N_{\Sigma}U_{cp}$ в кластере для интервалов подъёма и выдержки нагрузки стального цилиндрического сосуда

Рассмотрим результаты гидроиспытаний работающих под давлением сосудов блока очистки водорода водородной станции листопрокатного цеха № 5 ОАО Новолипецкого металлургического комбината (ОАО НЛМК). В качестве объектов АЭ-контроля были выбраны корпус сепаратора водорода (рис.7.3 а) и обечайки холодильника (рис. 7.3 б) блока очистки водорода. Рабочее давление данных сосудов составляет 1 МПа, толщина стенок $\delta = 8-10$ мм, материал - сталь 20, допускаемые напряжения $[\sigma] = 190$ МПа. Максимальное давление P_{max} опрессовки при гидроиспытаниях 1,25 МПа. Таким образом, максимальные расчётные напряжения в стенках корпуса сепаратора (формула Лапласа)

$$\sigma_{max} = P_{max} d / (2\delta) = 1,25 \cdot 200 / 8 = 31,25 \text{ МПа} ,$$

коэффициент запаса прочности

$$S_{ст} = [\sigma] / \sigma_{max} = 190 / 31,25 = 6,08 ,$$

или по формуле, рекомендованной НПО ЦКТИ им. И.И.Ползунова

$$S_{ст} = 207[\sigma] \delta / (P_{max} d - 1,1 P_{max} \delta) = 207 \cdot 19,8 / (12,5 \cdot 400 - 1,1 \cdot 12,5 \cdot 8) = 6,43,$$

где напряжения взяты в кГ/мм^2 , давление - в кГс/см^2
 Аналогично для обечайки $S_o = 9,35$, $S_o' = 10,02$.

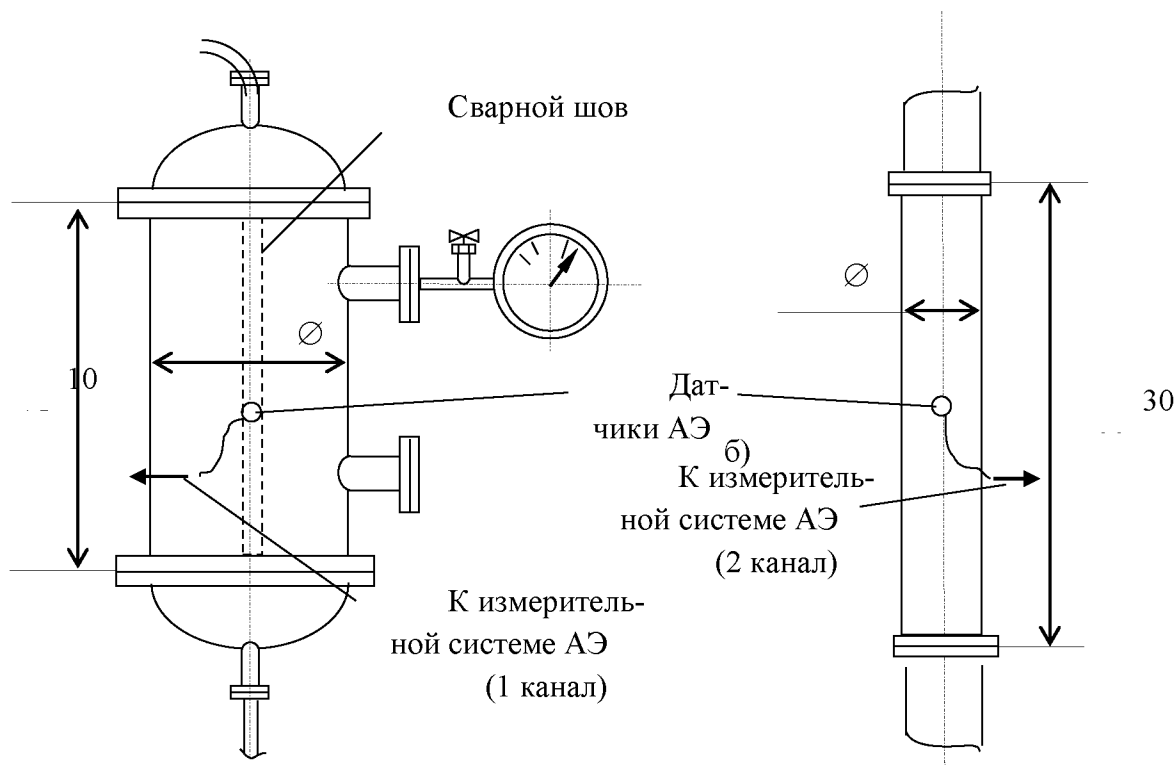


Рис.7.3. Объект контроля и схема установки пьезопреобразователей АЭ. а- корпус сепаратора водорода; б – корпус обечайки холодильника блока очистки водорода

Таким образом, коэффициенты запаса прочности материалов сосудов велики, в случае соответствия состояния сосудов номинальному, трещинообразование при диагностическом нагружении маловероятно, сигналы АЭ могут появиться при наличии либо концентратора напряжений, либо других источников упругого излучения (течи в соединениях, сдвижки частей соединений при повышении давления).

Для проведения АЭ-измерений на поверхностях сосудов зачищались участки и устанавливались датчики АЭ с частотной характеристикой 200-2000 кГц. Температура испытаний составляла 20^0 С . С целью уменьшения влияния промышленных помех применялись фильтры низких частот с частотой среза 200-1000 кГц. Предварительное усиление сигнала АЭ составляло 34 дБ, коэффициент передачи блока анализа – 10 дБ, уровень нижнего порога дискриминации-47 дБ в каждом канале. Акустико-эмиссионные испытания проводились при ступенчатом гидронагружении сосудов уровнями постоянных давлений 0,5, 1,0, 1,3 МПа в течение 5-10 мин с равномерными переходами от первого уровня до второго (20-25 сек), от второго к третьему (15-20 сек) и полным сбросом давления (рис.7.4). В результате испытаний были зарегистрированы сигналы АЭ от корпуса сепаратора водорода, что свидетельствовало о наличии источника упругого излучения в материале корпуса или в местах его сопряжения с другими частями. Визуальный осмотр сосудов после гидропресовки показал локальную разгерметизацию корпуса (течи) в местах установки манометра и во фланцевых соединениях, что и могло стать источником упругого излучения.

Кроме того, источником сигналов АЭ мог стать сварной шов на корпусе сепаратора. Анализ временных зависимостей числа импульсов АЭ позволяет рассчитать АЭ-показатель

$$kY_{AE} = \ln(N_{\Sigma I} / N_{\Sigma J}) / (P_I - P_J) = 0,$$

где N_I, N_J - активности АЭ при постоянных давлениях P_I и P_J соответственно. Амплитуда сигналов не превышала 62 дБ при пороге опасности (по амплитудному критерию) 70 дБ, длительность и энергия сигналов невысоки и не превышали значений 120 мкс и $3 \text{ мВ}^2 \cdot \text{мс}$. Это позволяло отнести вероятный концентратор напряжений к неопасному виду, а состояние сосудов принять удовлетворительным, что соответствовало результатам визуального осмотра сосудов после опрессовки. Аналогичные выводы были сделаны при анализе результатов АЭ-контроля целостности оболочки, не имеющей опасных дефектов (рис.7.5 а).

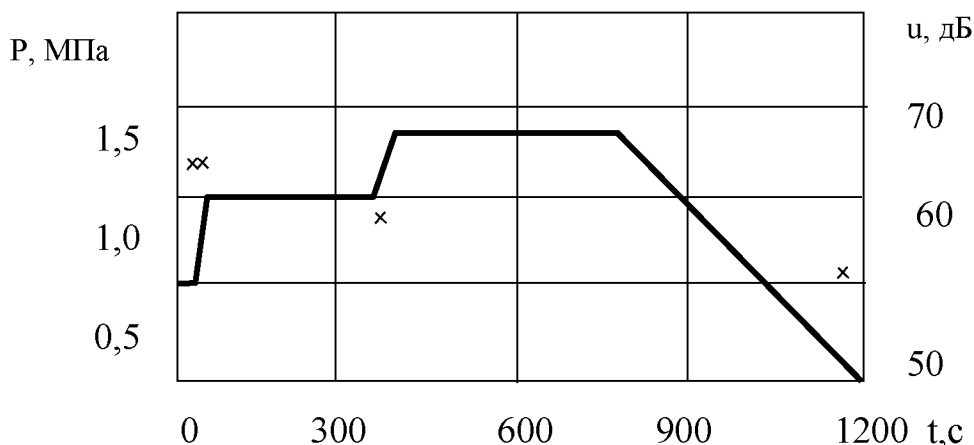


Рис.7.4. График гидронагружения корпуса сепаратора водорода и амплитуда сигналов АЭ

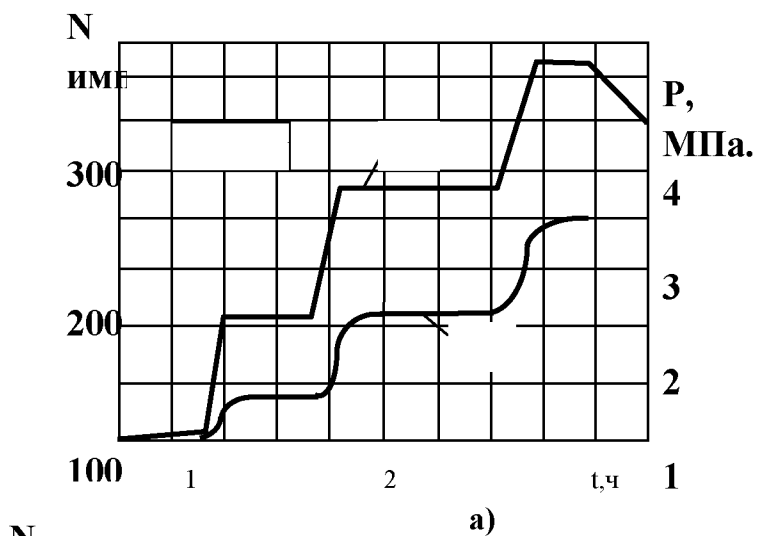
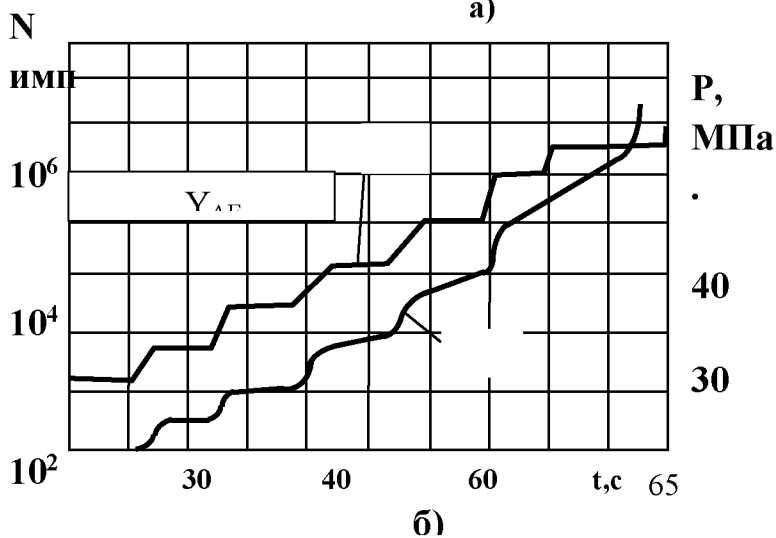


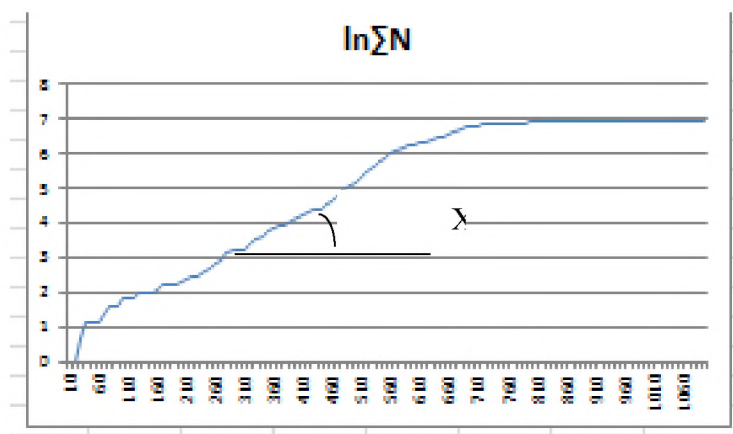
Рис.7.5. Графики гидронагружения и временная зависимость числа импульсов АЭ оболочки сосуда: а) Результаты испытаний оболочки без опасных дефектов; б) Результаты испытаний оболочки с концентраторами напряжений



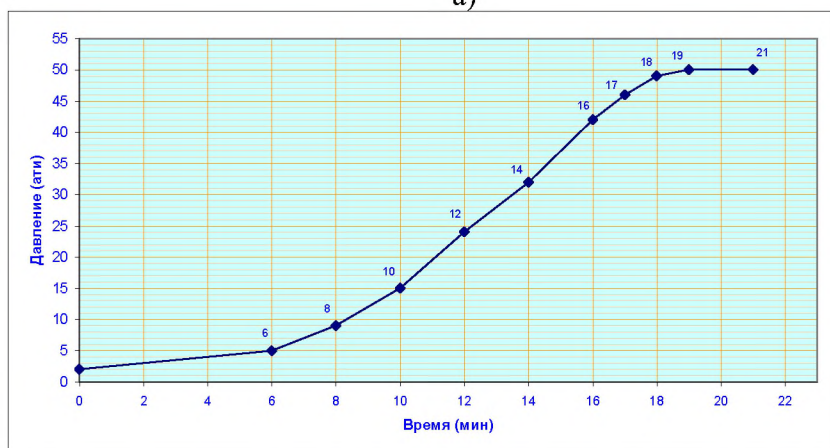
Временная зависимость же числа импульсов АЭ, полученная при опрессовке дефектных стальных сосудов с существенными концентраторами напряжений обнаруживает существенное повышение активности АЭ с ростом давления (рис.7.5 б) и существенное превышение параметром Y_{AE} допустимого значения.

Рассмотрим результаты АЭ-контроля прочности абсорбера очистки сероводорода К-2. На колонну, состоящую из 8 поясов сваренных встык листов были установлены 33 датчика АЭ, с помощью которых снимались значения первичных параметров АЭ – количество и время регистрации импульса, его амплитуда и количество выбросов в каждом импульсе. Наибольшее количество датчиков было установлено на самом потенциально опасном нижнем поясе (№8).

По результатам испытаний построены графики зависимости натурального логарифма информативного параметра АЭ ξ от времени (рис. 7.6 а). В качестве информативных параметров рассматривались количество сигналов, амплитуда сигналов, количество выбросов, произведения количества выбросов на амплитуду сигнала. По графикам были определены параметры X_{AE} и Y_{AE} как отношения приращения логарифма параметра к приращению времени или напряжений, рассчитанных по формуле Лапласа при известном давлении в абсорбере (рис. 7.6 б).



а)



б)

Рис. 7.6. Типичный вид временной зависимости логарифма числа импульсов АЭ одного из каналов(а) и график нагрузки (б) абсорбера очистки сероводорода.

Был определён ресурс зон возле преобразователей:
- исходный (с момента образования дефекта) по формуле

$$N_c = N_B / \exp(W_{AE}),$$

где

$$W_{AE} = Y_{AE} \cdot \sigma_{раб} = k Y_{AE} \cdot F_{раб} = d \ln \xi / dK_n \approx \omega, \quad (7.1)$$

где $K_n = F_i / F_{раб}$ – коэффициент нагрузки, $F_i, F_{раб}$ – диагностическая и рабочая нагрузки (давление); $\sigma_{раб}$ – рабочее напряжение (рассчитывается по формуле Лапласа), N_B — характеристический параметр материала и вида сварного соединения, температуры и частоты его нагружения. Величину N_B определяют либо по кривой усталости, (как значение, отсекаемое экстраполированной усталостной прямой на ось логарифма количества циклов до разрушения) либо по формуле

$$N_B = \exp(\ln N_G + \sigma_R Y_R), \quad (7.2)$$

где N_G — базовое число циклов, соответствующих перегибу кривой усталости (2×10^6); σ_R — предел выносливости при заданном коэффициенте асимметрии R цикла рабочих напряжений, при отсутствии данных принимаем $R = -1$ (двухфазные ферритно-мартенситные стали удовлетворительно свариваются методом точечной сварки. Предел выносливости при знакопеременном изгибе составляет для сварного шва и основного металла ($\sigma^* = 550$ МПа) соответственно 317 и 350 МПа, т. е. 50 и 60 % σ^* основного металла); Y_R – угловой коэффициент кривой усталости, представленной в полулогарифмических координатах (для стали 09Г2С равен $\approx 0,035 \div 0,046$ МПа⁻¹). По кривой усталости для стали 09Г2С также находим $N_B = 10^{10} / 1,58$.

Параметр N_B оказывается универсальной постоянной, поскольку выражается через относительно устойчивые величины

$$N_B = \tau_0 / \omega_p \exp[U_0 / (KT)],$$

где ω_p – период циклического нагружения.

- минимальный остаточный ресурс:

$$N_{ост} = N_B / \exp W_{AE} - N_{np}, \quad (7.3)$$

где N_{np} — фактическое число циклов предварительного нагружения.

Знание величин рабочей Y_R и Y_{AE} , рабочих напряжений и предела прочности позволяет рассчитать коэффициент запаса статической прочности и коэффициент снижения предела выносливости (см. формулы рис. 5.6)

Обработке подвергались две группы результатов регистрации сигналов АЭ, отличающиеся признаками отбраковки шумовых сигналов. В первой группе опытов отбрасывались низкоамплитудные сигналы, а во второй из рассмотрения были исключены сигналы со слишком большим количеством выбросов. Таким образом, были определены прочностные показатели для каждого датчика, которые были сгруппированы по поясам (рис. 7.7.) и сведены в обобщающую таблицу, где определены коэффициенты корреляции с номером пояса и построена диаграмма (рис. 7.8).

По поясам абсорбера были определены среднее количество сигналов, среднее и максимальное значение X_{AE} и Y_{AE} , минимальный коэффициент запаса статической прочности и минимальный и максимальный остаточные ресурсы, после чего найдены коэффициенты корреляции параметров с номером пояса (Табл. 7.2) и с площадью расслоения, определённой ультразвуковым методом (Табл. 7.3).

Кроме описанных результатов, для подтверждения возможности применения данной методики для оценки состояния сжимаемых сосудов давления (корпуса подводных аппаратов) были проведены испытания на образцах, которые представляли собой замкнутые кольца, к которым прикладывалась сжимающая нагрузка (Рис.7.9). Каждый образец был изготовлен из четырех сегментов сваренных между собой электродом марки 08Г2С, материал сегментов сталь марки Ст3. Сварные швы располагались таким образом, чтобы они находились в зоне максимальных напряжений. Было изготовлено четыре образца с различными искусственными дефектами в сварных швах (отверстия диаметром 4 мм) и один без дефектов. Образец помещался между захватами, с одной стороны между сварными швами к нему подключили датчик акустической эмиссии. (см. табл. 7.4).

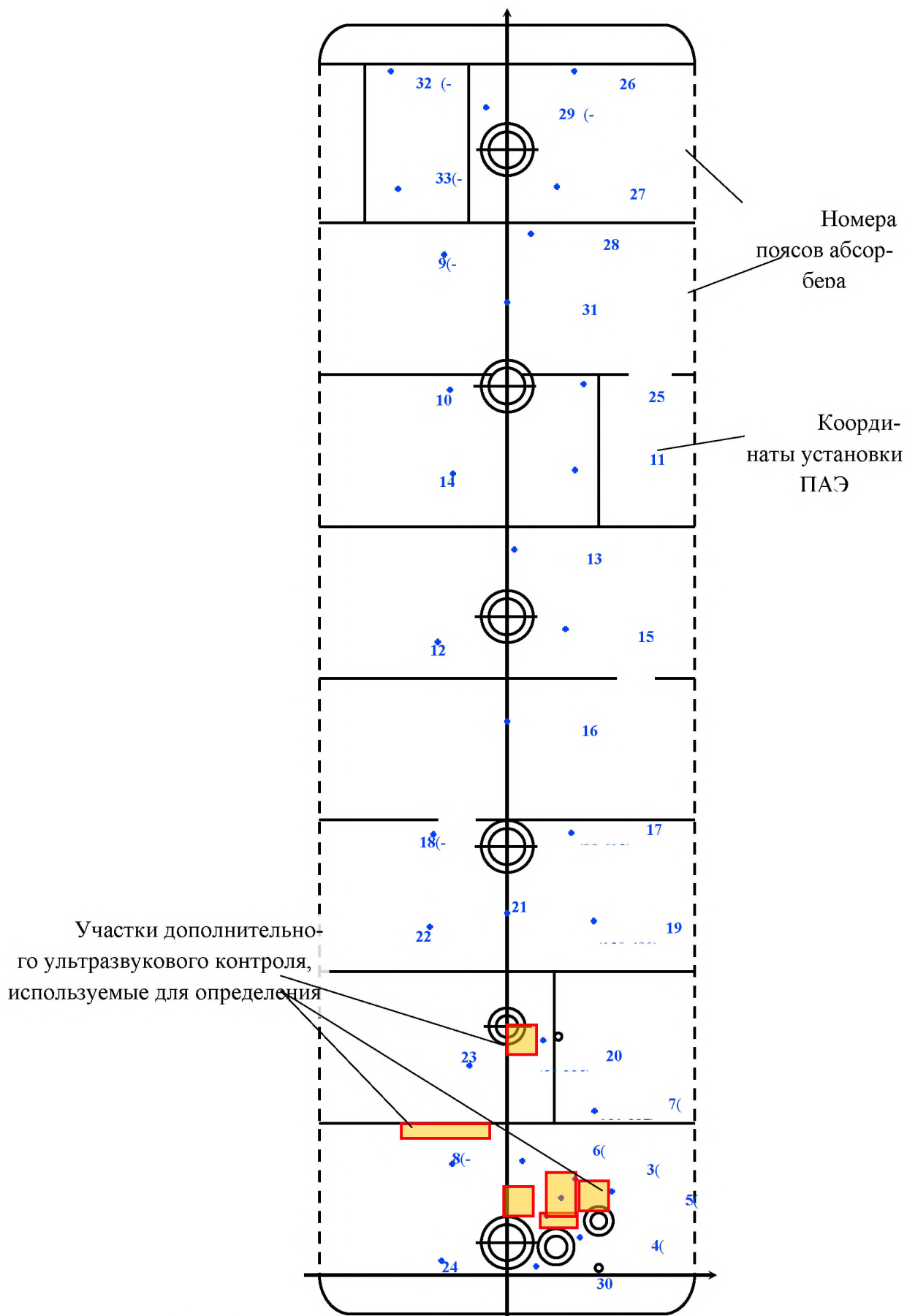


Рис. 7.7. Схема расположения ПАЭ, номера поясов колонны и расположения участков дополнительного ультразвукового контроля К-2.

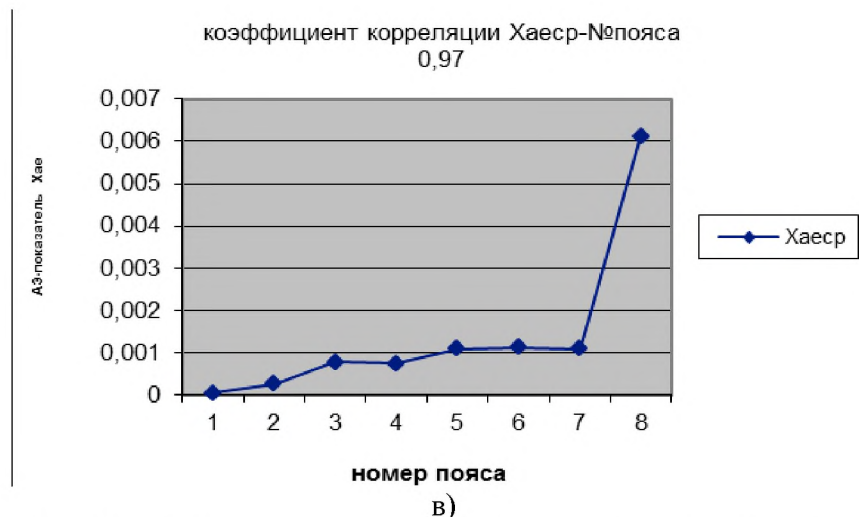


Рис. 7.8. График зависимости X_{AE} от номера пояса абсорбера.

Таблица 7.2

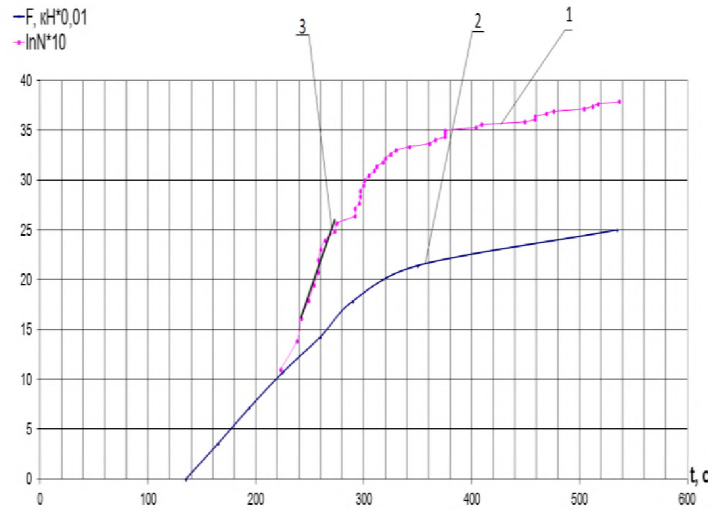
Корреляция основных параметров контроля с номером пояса абсорбера

Параметр, по которому определяется X_{AE}	N_{cp}	X_{AEcp} , c^{-1}	$X_{AE-макс}$, c^{-1}	Мин. коэф. запаса статической прочности	Остаточный ресурс максимальный, лет	Остаточный ресурс минимальный, лет
Полный набор сигналов АЭ						
Кол-во сигналов	0,893	0,984	0,909	-0,85	-0,955	-0,955
Суммарная амплитуда сигналов	0,893	0,967	0,942	-0,815	-0,964	-0,951
Количество выбросов	0,893	0,752	0,969	-0,597	-0,837	-0,834
Произведения кол-ва выбросов на амплитуду сигнала	0,893	0,736	0,646	-0,602	-0,845	-0,845
Сокращённый набор сигналов АЭ						
Количество сигналов	0,889	0,973	0,511	-0,604	-0,664	-0,662
Суммарная амплитуда сигналов	0,889	0,442	-0,233	-0,575	-0,331	-0,33

Таблица 7.3

Корреляция площади расслоения с параметром X_{AE} и суммарным количеством импульсов $N_{сумм}$

Параметр, по которому определяется X_{AE}	A- X_{AE}	A- $N_{сумм}$
Полный набор сигналов АЭ		
Количество сигналов	0,842	0,621
Амплитуда сигналов	0,85	0,621
Количество выбросов	0,851	0,621
Произведения количества выбросов на амплитуду сигнала	0,851	0,621
Сокращённый набор сигналов АЭ		
Количество сигналов	0,839	0,793
Амплитуда сигналов	0,823	0,793



а)

б)

Рис.7.9. Результаты АЭ исследования сжимаемых колец

а – нагружающее устройство с захватами во время проведения экспериментов; б – зависимость логарифма числа импульсов (1), нагрузки от времени (2) и участок упругого кинетически однородного разрушения (3), на примере образца 1

Таблица 7.4

Результаты оценки параметра X_{AE} сжимаемых колец

Номер образца	Дефекты образца	X_{AE} , 1/с	Максимальные напряжения вблизи дефектов [МПа]
5	2 несквозных отверстия внутри: 4 мм и 3 мм	0,0364	268
4	2 несквозных отверстия снаружи: 2,4 мм и 3,2 мм; свищ 1 мм	0,0322	178
1	2 сквозных отверстия	0,0282	253
3	2 несквозных отверстия: внутри 3,5 мм, снаружи 3 мм	0,0272	274
2	Без дефектов	0,0063	177
0,9476			

Пример составления протокола испытаний.

Рассмотрим АЭ контроль состояния внутреннего корпуса криогенного газификатора типа ГХК-8/16-500. Целью контроля сосуда являлось выявление соответствия состояния сосуда действующим нормам и правилам безопасности с определением возможности, условий и срока дальнейшей эксплуатации. При проведении экспертизы использованы данные из паспорта с основными данными по сосуду, результаты визуального контроля наружного кожуха сосуда, результаты цветной дефектоскопии с использованием набора дефектоскопических материалов в аэрозольной упаковке, акустико-эмиссионного контроля внутреннего корпуса, проверки герметичности теплоизоляционной полости (по величине натекания давления в изоляционной полости за сутки), данные владельца сосуда о количестве циклов нагружения.

Данные об объекте контроля:

- внутренний корпус изделия ГХК-8/16-500
- изготовитель - предприятие (г.Омск-99); год изготовления 1981 г.;
- регистрационный номер 71439; заводской номер 8101004;
- дата ввода в эксплуатацию 1982 г.;

- марка материала сталь 12X18H10T (ГОСТ 5632-72);
- метод изготовления сварка;
- габаритные размеры: длина 4270 мм,
диаметр внутренний 1600 мм;
- толщина стенки: обечайки 12 мм, днищ 14 мм;
- внутренний объём 8,0 м³; пространственное положение вертикальное
- рабочее давление 16 кгс/см² (с учётом вакуума в межстенном пространстве);
- рабочая температура -196 °С;
- рабочая среда кислород (некоррозионная);
- состояние поверхности порошковая теплоизоляция;
- магнитные свойства немагнитный материал;
- эскиз сосуда с указанием размеров и схемой размещения ПАЭ приведены на рис. 7.11.

Тип и условия испытаний:

- рабочее тело пневматическое;
- температура объекта + 15 °С, окружающей среды + 15 °С.

Нагружение осуществлялось с использованием баллонов через разрядную рампу;

Параметры графика нагружения:

Величины давления на ступенях выдержек: первое нагружение 7,0; 9,2; 14,3; 17,1 кгс/см²; второе нагружение 7,0; 10,8; 11,4; 17,1 кгс/см²;

- время выдержки на ступенях 7,0 кгс/см² 12 мин.; 9,2, 10,8, 11,4, 14,3 и 17,1 кгс/см² 10 мин

- испытательное давление 17,1 кгс/см²;

- средняя скорость нагружения: первичного 0,05 кгс/см² в мин, повторного 0,104 кгс/см² в мин.

Тип и основные характеристики АЭ-аппаратуры:

Система акустико-эмиссионная диагностическая СДАЭ-16(2), состоящая из блока сбора и обработки АЭ-информации и имеющая следующие основные характеристики:

- независимые приёмные каналы (2 шт.);
- рабочий диапазон частот 20÷1000 кГц;
- коэффициент усиления предварительного усилителя 34±1 дБ.
- диапазон изменения программируемого коэффициента усиления основного усилителя от минус 20 до 40 дБ с шагом 0,375 дБ;
- программно-управляемый порог дискриминации;
- первичные измеряемые параметры: время прихода сигнала АЭ с начала испытания, время нарастания сигнала, длительность сигнала, число выбросов сигнала, амплитуда импульсов, энергия импульса.

Число и тип преобразователей.

Система комплектуется четырьмя ПАЭ типа П113с диапазоном частот (по два на диапазон) 20-200 кГц и 200-2000 кГц соответственно.

Контактная среда : литол, установка ПАЭ через волновод (рис.7.10, 7.11-7.13).

Режим работы аппаратуры

- коэффициент предварительного усиления 34 дБ; коэффициент основного усиления по каналам 10 дБ;
- уровень дискриминации по каналам -43,250 дБ;
- уровень собственных шумов усилительного тракта, приведённый ко входу предварительного усилителя не превышает 5 мкВ.

Изменение параметров аппаратуры в ходе испытаний: не было.



а)



б)



в)



г)

Рис. 7.10. Установка ПАЭ на волноводы, вставляемые в отверстия внешнего корпуса через теплоизоляционный материал. а- внешний вид газификатора; б -действия специалиста неразрушающего контроля; в,г- установленный на волновод преобразователь и предварительный усилитель (вид со стороны пульта управления)

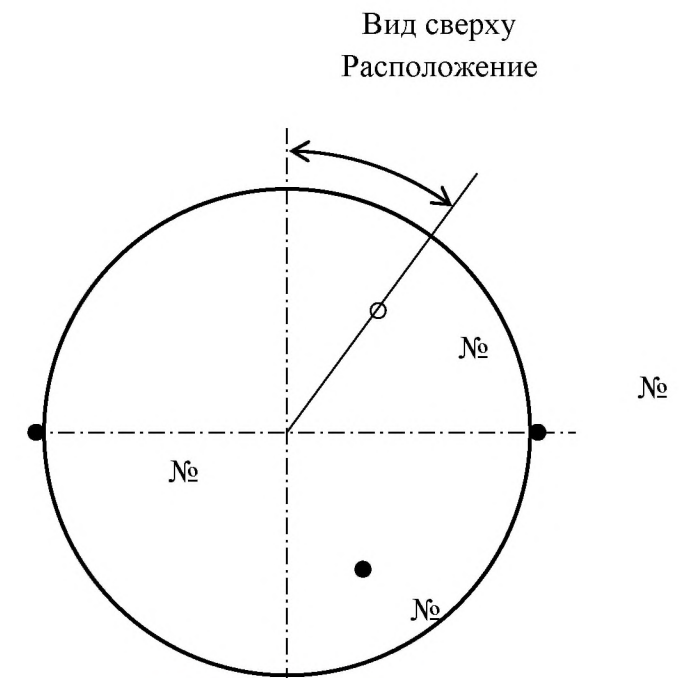
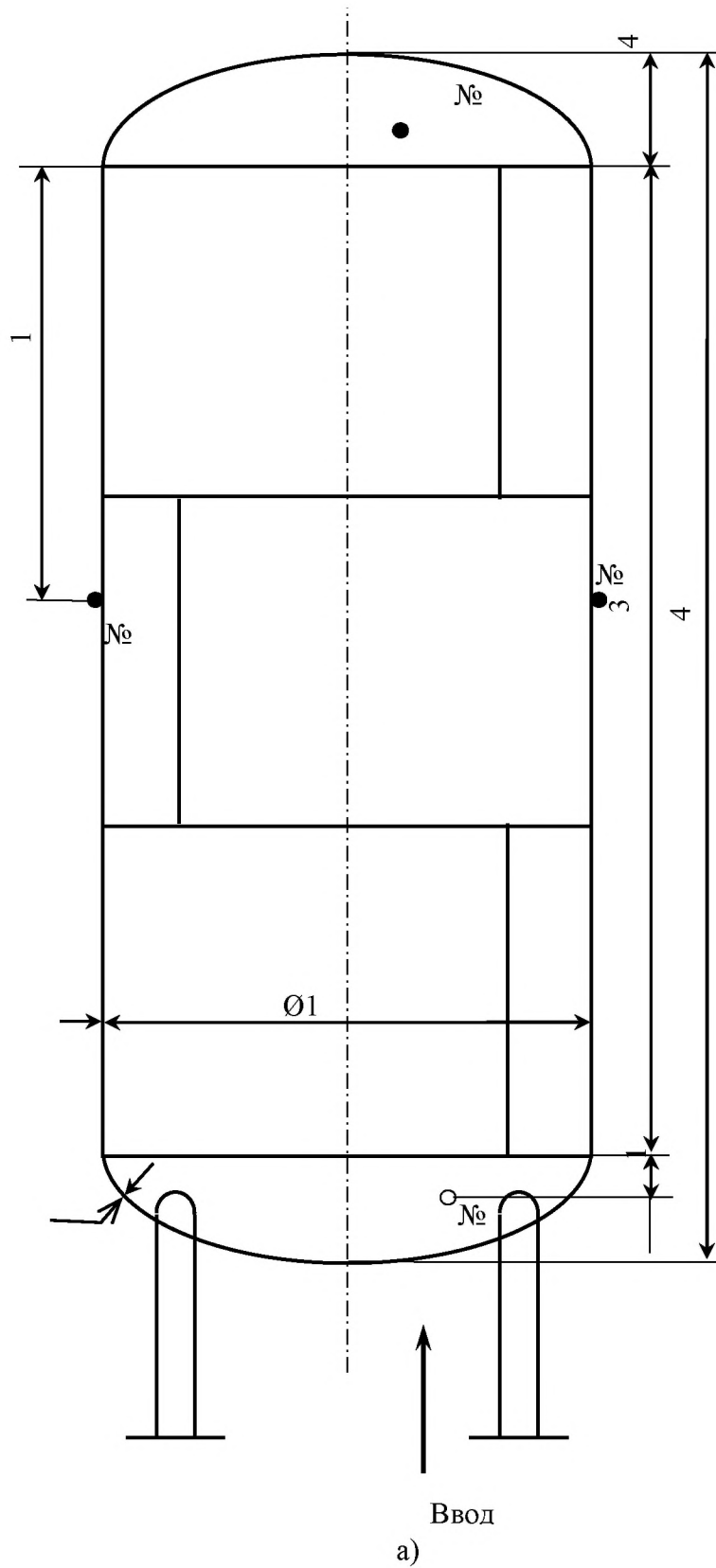


Рис.7.11. Эскиз внутреннего корпуса изделия ГХК-8/16-500, схема расположения (а) и установка ПАЭ (б)

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Практическое занятие № 1.

Акустико-эмиссионный контроль прочности сварных соединений

Задание: по данным регистрации сигналов АЭ различных образцов и элементов конструкций со сварными соединениями, выданных преподавателем, определить диагностические параметры АЭ и связать их с показателями прочностного состояния.

Сварные соединения широко распространены в машиностроении. Зависимость прочности сварных соединений от дефектов делает их поведение слабо прогнозируемым. Решить проблему позволяет методологически строго проведенный акустико-эмиссионный (АЭ) неразрушающий контроль (НК) прочности, эффективность которого во многом зависит от используемой методической базы. Классификация методических подходов в АЭ контроле и диагностировании (АЭД) прочностного состояния материалов и технических объектов, (рисунок 1) позволяет выделить три направления, наиболее развитых с точки зрения обеспечения контролепригодности и информативности диагностических параметров АЭ [1-6]:

-статистический, основанный на сравнении с допустимыми значениями величин простых первичных параметров АЭ - числа импульсов N_{Σ} , средней A_{cp} , максимальной A_{max} или суммарной A_{Σ} амплитуды, энергии E , сигналов (площади под огибающей импульса АЭ), либо их распределений и различных статистических инвариантов;

- два физических, основанных на механических или кинетических закономерностях механики и микромеханики разрушения (МР) и принципах информационной оптимизации технологий АЭ контроля.

Несовершенство строения научно-технической базы (рис 1 а), связанное с недостаточным пониманием физических закономерностей и моделей диагностических параметров АЭ, сложностью моделей и неподготовленностью персонала специалистов АЭ контроля, объясняет доминирование статистического подхода к интерпретации получаемых результатов и ориентацию действующих Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля [3] на необходимость получения дополнительной информации посредством обучающего эксперимента, что не всегда эффективно на стадии мелкодисперсного разрушения и неприменимо для сложных и уникальных объектов, не позволяющих провести обучающий эксперимент.



Физические подходы к методу АЭД

Механический подход



**Модель
развития трещины**

Модель
Периса-Эрдогана
Скорость развития
трещины $V=A K_I^m$

**Механическая модель
параметров АЭ**

Скорость счёта АЭ Модель Данегана
 $N^* = A_D K_I^m$

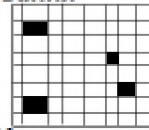
**m-показатель Иванова-
Быкова**

Информационно- кинетический подход

**Модель
микротрещинообразования**

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{C_0 - C(t)}{\Theta_{CF}(t)}$$

$\theta_{CF} = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma)/(KT)]$ -
формула Журкова



**Микромеханическая модель
параметров АЭ**

Число импульсов АЭ
 $N_{\Sigma}(t) = k_{AE} C(t)$ Модель Носова

$Y_{AE} = \gamma/(KT)$, $W_{AE} = \gamma\sigma/(KT)$ -
показатели Носова

б)

Рисунок 1 - Классификация методических подходов в акустико-эмиссионном контроле и диагностировании (АЭД) прочностного состояния материалов и технических объектов. а) классификация подходов к акустико-эмиссионному диагностированию; б) наиболее развитые физические подходы

Цель работы состояла в иллюстрации предпочтительности развиваемого авторами статьи информационно-кинетического подхода к АЭ оценке прочности сварных соединений, основанном на микромеханической модели разрушения и временных зависимостей параметров АЭ [4-6]. В качестве критерия предпочтительности выбран характеризующий информативность контроля коэффициент корреляции предлагаемых диагностических параметров АЭ с показателями прочности или ресурса сварных соединений, а для наглядности иллюстративного материала подробно рассмотрена как сама микромеханическая модель, так и результаты обработки первичной АЭ информации, полученной при испытании различных образцов сварных соединений.

Микромеханическая модель временных зависимостей первичных параметров акустической эмиссии и информативные диагностические параметры

Регистрируемая в процессе испытаний первичная АЭ информация количественно описывается микромеханической моделью временных зависимостей параметров АЭ, построенной на основе микромеханики разрушения, кинетической теории прочности и статистических закономерностей упругого излучения.

Для обеспечения информативности АЭ контроля значения первичных параметров АЭ $\xi(t)$ должны иметь смысл аналогов повреждаемости материала и, в частности, быть пропорциональными величине концентрации $C(t)$ образующихся микротрещин

$$\xi(t) = k_{AE} C(t) = k_{AE} C_0 \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} \Psi(\omega) \left\{ 1 - \exp \left[- \int_0^t dt' / \Theta(U_0, \omega(t')) \right] \right\} d\omega, \quad (1)$$

где t – текущее время, k_{AE} - акустико-эмиссионный коэффициент (АЭК).

$$k_{AE} = V \iiint_{\Delta t, f, u} \Phi(\Delta t, f, u) du df d\Delta t \quad (2)$$

где V - контролируемый объем материала, C_0 – начальная концентрация структурных элементов; ω – параметр прочностного состояния структурного элемента материала объекта,

зависящего от изменяющихся во времени растягивающих напряжений на микроэлементе $\sigma(t)$. Временная зависимость прочностного параметра

$$\omega(t) = \gamma\sigma(t)/(KT), \quad (3)$$

где γ – структурно-чувствительный коэффициент; K – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; $\Psi(\omega)$ – моделирующая прочностную неоднородность и пластическую перестройку прочностного состояния функция плотности распределения параметра ω по структурным элементам контролируемого объема V материала, $\Theta(U_0, \omega(t)) = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma(t))/(KT)]$ – время разрушения микроэлемента (формула Журкова), U_0 – энергия активации процесса разрушения, ω_0 и $\Delta\omega$ – нижняя граница и диапазон рассеяния значений параметра ω соответственно. В качестве АЭ аналогов повреждаемости материала $\xi(t)$ могут выступать число импульсов, суммарная АЭ, суммарная амплитуда или энергия сигналов АЭ. Информативными параметрами могут являться любые первичные параметры АЭ – число N_Σ регистрируемых импульсов дискретной АЭ, суммарный счет N АЭ, суммарная амплитуда или комбинация этих параметров.

Уравнение (1) представляет собой модель временных зависимостей параметров акустической эмиссии, регистрируемой на стадии мелкодисперсного разрушения любого масштабного уровня в условиях неоднородности прочностного состояния материала контролируемого объекта, позволяющую в совокупности с известным критическим значением относительной концентрации микротрещин и отработанным ресурсом оценить остаточный ресурс. Модель (1) объединяет физический и статистический подходы в АЭД, позволяет направлять поиск наиболее информативных акустико-эмиссионных показателей и способы их оценки. Стабильность значений U_0 подтверждает вывод о том, что основной характеристикой структуры конкретного образца является его структурно-чувствительный коэффициент γ , а для АЭ-оценки прочности, контроля или диагностики состояний промышленных объектов в большинстве случаев достаточно определение его величины или величин параметра ω .

Определение параметров модели является наиболее сложным, поскольку наиболее абстрагирован и требует детально обоснованного принятия дополнительных условий, снимающих излишнюю неопределенность. Наибольшее количество работ в той или иной форме посвящено поиску связи между входящими в (1) параметрами на основе решения динамической задачи теории упругости. Поиск осложняется при учете анизотропии упругих свойств, приводящей к неопределенности значения коэффициента $k_{AE}C_0$, отражающей индивидуальность результатов АЭ-измерений и зависимость от типа диагностируемого объекта, его формы, размеров, вида дефектов, технологии изготовления, вида напряженного состояния, аппаратуры, помех, способа и качества крепления датчиков, коэффициента усиления измерительного тракта системы АЭ и его колебаний, расстояния датчика до источника АЭ и других факторов, дестабилизирующих связь параметров АЭ со степенью опасности дефекта или прочностными показателями объекта контроля.

Для уменьшения степени влияния этих факторов формулируются стабилизирующие значения k_{AE} условия проведения АЭ измерений, которые состоят в обеспечении в момент проведения АЭ контроля:

- стабильности контролируемого объема, диагностируемого объекта;
- стабильности коэффициента усиления и порогов дискриминации измерительной системы АЭ;
- стабильности характеристик энергетического или амплитудного распределения сигналов АЭ;
- подобия диагностического и рабочего нагружения диагностируемого объекта;
- постоянной скорости диагностического нагружения.

Большинство этих требований обеспечивает выполнение Правил [3].

Связывая параметры однородного этапа микроскопического разрушения с параметрами АЭ, модель позволяет формулировать соответствующие микро- и нано- уровням

энергетические, структурные и временные характеристики прочности, предложить ряд ценных диагностических АЭ-показателей прочностного состояния (табл. 1, [4-8]), лежащих в основе алгоритмов неразрушающего АЭ контроля прочности.

Таблица 1- Некоторые концентрационно-кинетические АЭ-показатели прочностного состояния технических объектов, устойчивые к влиянию дестабилизирующих факторов

АЭ показатель	Микромодель	Нано-модель	Свойство
X_{AE}	$d \ln \xi / dt$	$\dot{\gamma} \sigma / KT$	наноструктура
Y_{AE}	$d \ln \xi / d \sigma$	γ / KT	наноструктура
Z_{AE}	$\ln \xi - \ln A_D$	$\omega = \gamma \sigma / KT$	опасность разрушения
ΔZ_{AE}	$\ln \xi_1 - \ln \xi_2$	$\omega_1 - \omega_2$	относительная опасность
F_{AE}	$\ln \xi_1 / \ln \xi_2$	σ_1 / σ_2	относительная нагруженность
W_{AE}	$d \ln \xi / d K_H$	$\omega = \gamma \sigma / KT$	опасность разрушения

где $A_D = k_{AE} C_0 / \{ \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma \sigma(t)) / (KT)] \}$, K_H - коэффициент нагрузки (отношения диагностической нагрузки к рабочей).

Время до разрушения при постоянной нагрузке ($\sigma = \text{const}$)

$$t^* \approx 10^{-15} \exp(U_0 / KT - Y_{AE} \sigma) = \exp(M - Y_{AE} \sigma) = B / \exp W_{AE}, \quad (4)$$

где $M \approx U_0 / (KT) - 34$, $B = \exp M$

Предел прочности

$$\sigma^* = t^* \dot{\sigma} = \{ U_0 - KT \ln [KTC_0 / (\tau_0 \gamma \dot{\sigma} C^*)] \} / \gamma \approx M / Y_{AE} \quad (5)$$

Разрушающая нагрузка

$$F_p \approx M / (k Y_{AE}), \quad (6)$$

где $k = \sigma / F$ - коэффициент пропорциональности между напряжениями и внешней нагрузкой F .

Число циклов до разрушения

$$N_C = N_B / \exp W_{AE}, \quad (7)$$

где N_B - характеристический параметр материала, температуры и частоты его нагружения, определяется по кривой усталости образцов данного материала.

Экспериментальных исследований и их анализ.

Для демонстрации эффективности предлагаемого подхода проанализируем результаты как авторских лабораторных экспериментов, так и полученные другими исследователями. Авторские экспериментальные исследования проводились на плоских и кольцевых образцах сварных соединений, выполненных встык и внахлест из стали марок Ст3 и 09Г2С с искусственно созданными дефектами, детальное описание которых проведен в работах [4-6]. Сторонние исследования проведены на плоских образцах [7] (рисунок 2), выполненных из стали 03Х11Н8М2Ф - ВД со стыковыми сварными швами и различными созданными в ходе сварки технологическими дефектами. Образцы нагружались на растяжение или сжатие с постоянной скоростью F'_p роста нагрузки, а результаты контроля представлены в виде временных диаграмм и таблиц нагрузок, суммарного счета (числа импульсов), суммарной амплитуды сигналов АЭ и величин разрушающих нагрузок или моментов образования трещины. Наблюдение за процессом разрушения проводилось с помощью автоматизированных диагностических акустико-эмиссионных систем СДАЕ-16(2), разработанной в ООО "НПП Промдиагностика" г. Санкт-Петербург, и СТД - 2, разработанной в Институте электросварки им. Е.О. Патона.

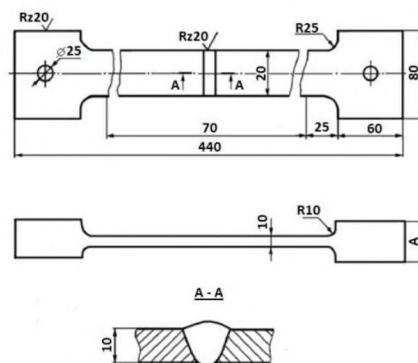


Рисунок 2 – Плоские образцы со стыковыми сварными швами

В таблице 2 приведены данные испытаний для образца №12 [7], имеющего 2 подреза глубиной 2 мм и трещину по кромке сварного шва длиной 3 мм. В качестве первичного параметра ξ выбрано суммарное число импульсов акустической эмиссии N_{Σ} и суммарная амплитуда A_{Σ} сигналов АЭ.

Согласно [4-6], участки временных зависимостей числа $N_{\Sigma}(t)$ регистрируемых при нагружении импульсов акустической эмиссии (АЭ) на этапе однородного разрушения при нагружении с постоянной скоростью $\dot{\sigma}$ роста напряжений описываются выражением

$$N_{\Sigma}(t) = K_{AE} C_{0KT} \times \exp \left[\frac{\gamma \dot{\sigma} t - U_0}{KT} \right] / (\tau_0 \gamma \dot{\sigma}). \quad (8)$$

Таблица 2 – Первичные данные экспериментов для образца №12

Время испытаний t, с	Число импульсов N_{Σ}	Суммарная амплитуда A_{Σ} , мВ	Разрушающая нагрузка F, кг
475	35	2400	1000
950	45	2400	2000
1425	90	4800	3000
1900	170	7200	4000
2375	215	12000	5000
2850	295	18000	6000
3325	370	24000	7000
3800	450	32400	8000
4275	560	42000	9000
4750	790	73200	10000
5225	1160	133200	11000
5463	1460	170400	11500
5700	2700	280800	12000

На графиках временной зависимости (8), представленной в полулогарифмических координатах, этап однородного разрушения описывается прямолинейным участком. На рисунках 3а и 3б показано определение этапа однородного разрушения при использовании в качестве первичного параметра ξ числа импульсов и суммарной амплитуды сигналов АЭ соответственно.

В работе предлагаются диагностические параметры X_{AE} и Y_{AE} , определяемые из (8) как производные от $\ln(N_{\Sigma}(t))$ по времени и напряжениям соответственно.

$$X_{AE} = \frac{d}{dt} \ln(N_{\Sigma}(t)) = \frac{\gamma \dot{\sigma}}{KT}; \quad (9)$$

$$Y_{AE} = \frac{\gamma}{KT} \quad (10)$$

или

$$Y_{AE} = \frac{X_{AE}}{\dot{\sigma}} = X_{AE} \cdot \frac{dt}{d\left(\frac{P \cdot g}{A}\right)} = X_{AE} \cdot \frac{A}{g} \cdot \frac{dt}{dP} \quad (11)$$

где A – площадь сечения активной части образца, равная 200 мм^2 [11], g – ускорение свободного падения. В случае использования в качестве первичного параметра суммарной амплитуды сигналов A_{Σ} параметры X_{AE} и Y_{AE} определяются аналогично (9)-(11).

Диагностический параметр X_{AE} является показателем прочности, поскольку его значение связано со степенью опасности дефектов, временем до разрушения, пределом прочности σ^* , разрушающей нагрузкой F_p , ресурсом и определяется на этапе кинетически однородного разрушения при равномерном нагружении с постоянной скоростью роста напряжений $\dot{\sigma}$ и нагрузки F' на образец в момент диагностического АЭ-испытания.

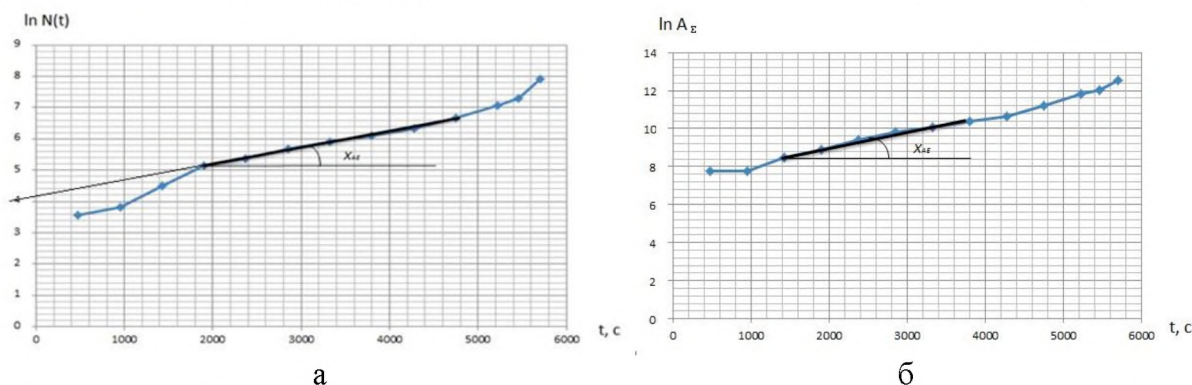


Рисунок 3 – Временные зависимости логарифма числа импульсов (а), суммарной амплитуды (б) при нагружении образца №12 и определение ординаты $\ln N_{\Sigma 0}$

Для всех образцов в вышеизложенной последовательности были рассчитаны значения диагностических параметров X_{AE} и Y_{AE} , результаты расчета последнего представлены в таблице 3. Как и ожидалось, суммарный счет акустической эмиссии и суммарная амплитуда сигналов АЭ слабо коррелировали с разрушающей нагрузкой F_3 (коэффициент корреляции 0,157 и 0,202 соответственно), корреляция же значений F_3 и показателя Y_{AE} существенно лучше (коэффициент корреляции -0,742), что говорит о большом информативном преимуществе Y_{AE} относительно разрушающей нагрузки перед первичными параметрами N_{Σ} и A_{Σ} .

В дополнение найдем параметр $k_{AE}C_0$, характеризующий «звучащий» объем и количество источников потенциально регистрируемой акустической эмиссии. Последовательность расчета указанного параметра изложена в [5].

$$k_{AE}C_0 = \exp[\ln N_{\Sigma 0} + \frac{U_0}{kT} + \ln(\tau_0 X_{AE})]. \quad (12)$$

где $\ln N_{\Sigma 0}$ – ордината, отсекаемая экстраполяцией на ось $\ln N_{\Sigma}$ линейного участка зависимости $\ln N_{\Sigma}(t)$, равная 4,2 для образца №12 (рисунок 3а).

Период атомных колебаний τ_0 и энергия активации процесса разрушения U_0 , входящие в (15), являются относительно стабильными величинами. Значения энергии активации определены согласно [4], среднее значение U_{0cp} оказалось равным 113,6 Дж/моль (разброс значений U_0 до 12 % от среднего обусловлен влиянием внутренних напряжений в образцах).

В таблице 3 приведены значения параметра $k_{AE}C_0$, рассчитанные при среднем значении энергии активации процесса разрушения. Для образцов №№5,6,12,13,14,15 в таблице указаны эквивалентные размеры дефектов (суммарная длина), позволяющие установить корреляционную связь параметра $k_{AE}C_0$, с размерами дефектов. Коэффициент корреляции составил 0,689, что подтвердило информативность параметра $k_{AE}C_0$ по отношению к геометрическим характеристикам дефектов.

Таблица 3 - Результаты расчета диагностических параметров

№ обр.	Вид технологического дефекта	Макс. нагрузка, кг	N_{Σ}	$A_{\Sigma} 10^{-3}$, мВ	Y_{AE} по N	Y_{AE} по A_{Σ}	$k_{AE}C_0$	Сумм. длина дефекта
5	Бездефектный сварной шов	13850	222	79,8	0,0064	0,011	4038	0
6	Непровар длиной 15 мм	13850	645	44,5	0,004	0,0019	23246	15
7	Три непровара и поры 0,5 мм	6850	7000	965	0,025	0,017	134853	-
8	Непровар и поры 0,5...1 мм	8440	13350	2389,6	0,010	0,014	1110341	-
9	Четыре поры d 3...5 мм	5538	1100	204	0,012	0,014	173770	-
10	Восемь пор d 0,8 мм и микротрещина	5350	1500	115	0,017	0,015	161165	-
11	Два подреза и поры d 0,01...0,2 мм	11545	13657	2485	0,01	0,0067	449017	-
12	Два подреза глубиной 2 мм и трещина по кромке шва, L=3 мм	12000	2700	281	0,0058	0,0077	245083	3
13	Трещина вдоль шва L=17 мм	3920	3590	488	0,015	0,020	2109823	17
14	Трещины: поперечная L=4 мм, продольная L=12 мм	410	2230	219	0,116	0,135	4108261	16
15	Трещина: поперечная L=10 мм, продольная L=17 мм и 5 пор	1195	1262	101	0,061	0,067	2973006	27
Коэффициент корреляции с максимальной нагрузкой			0,157	0,202	-0,742	-0,729		

В таблице 4 для образцов, имеющих дефекты в виде непроваров и пор, проведено ранжирование по числу $k_{AE}C_0$.

Таблица 4 – Ранжирование дефектов по параметру $k_{AE}C_0$

№ обр.	Вид дефекта	$k_{AE}C_0$
5	Бездефектный сварной шов	4038
6	Непровар длиной 15 мм	23246
7	Три непровара и поры 0,5 мм	134853
10	Восемь пор d 0,8 мм и микротрещина	161165
9	Четыре поры d 3...5 мм	173770
11	Два подреза и поры d 0,01...0,2 мм	449017
8	Непровар и поры 0,5...1 мм	1110341

Очевидно, что бездефектный образец имеет наименьшее количество источников АЭ.

Увеличение $k_{AE}C_0$ образцов 6 и 7 по сравнению с №5 обусловлено наличием 1 и 3 непроваров соответственно. Увеличение диаметров пор (следовательно, суммарного объема дефектов) также ведет к увеличению $k_{AE}C_0$ (у образцов 7,10,9). Резкое возрастание числа $k_{AE}C_0$ наблюдается у образца №11, т.е. дефекты в виде подрезов оказались более активными источниками АЭ.

В таблицу 5 сведены значения прогнозируемых разрушающих нагрузок, рассчитанные по (19), вытекающих из (10), (11), (12), (18), с указанием погрешности по отношению к экспериментальной разрушающей нагрузке бездефектного образца.

$$F_p = \frac{U_0 - 35 + \ln(F'_p \cdot k_{Y_{AE}})}{k_{Y_{AE}}} = \frac{U_0 - 35 + \ln(F'_p \cdot \frac{Y_{AE}}{A})}{Y_{AE}} \cdot A ; \quad (13)$$

$$Y_{AE} = \frac{Y}{KT} = k_{Y_{AE}} A ; \quad (14)$$

Коэффициент корреляции прогнозируемых и действительных разрушающих нагрузок составляет 0,917, средняя ошибка расчетов $\Delta=11\%$.

Уменьшение погрешностей оценки возможно посредством устранения мультипликативных помех (учета нестабильности k_{AE}) на основе использования амплитудного распределения сигналов АЭ [4,5]. Для всех образцов были скорректированы значения параметра $k_{Y_{AE}}$ с учетом амплитудного распределения с допущением того, что оно описывается экспоненциальным законом. При этом коэффициент корреляции прогнозируемых F_p и действительных F_3 разрушающих нагрузок стал равным 0,910, а средняя ошибка расчетов уменьшилась до 10%.

Рассчитанные по без учета и с учетом изменения амплитудного распределения значения параметра Y_{AE} и разрушающих нагрузок по (19) приведены в сравнительной таблице 5.

Таблица 5 – Параметры АЭ для плоских образцов

№ обр.	F_3 , Н	скорость роста нагрузки F'_3 , Н/с	Без учета амплитудного распределения			С учетом амплитудного распределения		
			Y_{AE} , МПа ⁻¹	F_p , Н	Δ^* , %	Y_{AE} , МПа ⁻¹	F_p , Н	Δ , %
5	135869	21,74	0,0064	102840	24	0,0038	145767	7
6	135869	21,57	0,004	140645	4	-0,0004**	-	-
7	67199	48,00	0,025	43564	35	0,0224	47640	29
8	82796	19,25	0,010	72316	13	0,01	72316	13
9	54328	18,26	0,012	62419	15	0,0122	61667	14
10	52484	18,51	0,017	48319	8	0,0166	49197	6
11	113256	17,91	0,01	70864	37	0,0098	71898	37
12	117720	20,65	0,0058	108316	8	0,004	138480	18
13	38455	27,47	0,015	58354	52	0,0156	56612	47
14	4022	6,36	0,116	8551	113	0,1152	8593	69
15	11723	39,08	0,061	20104	71	0,0618	19886	70
Средние значения					11			10 (для 10 обр.)
Корреляция с F_3				0,917			0,910	

*Относительная ошибка определена как отношение разницы между расчетной и действительной разрушающими нагрузками к действительной разрушающей нагрузке бездефектного образца

**Знак «-» обусловлен влиянием неоднородности состояний структурных элементов образцов, проявляющейся на рассмотренных этапах нагружения

Примечательно, что значения Y_{AE} согласуются с величиной Y_R углового коэффициента кривой усталости идентичных образцов, имеющих тот же физический смысл $Y_R = -d \ln N_C / d \sigma_{max} = \gamma / K_T$ (рисунок 4).

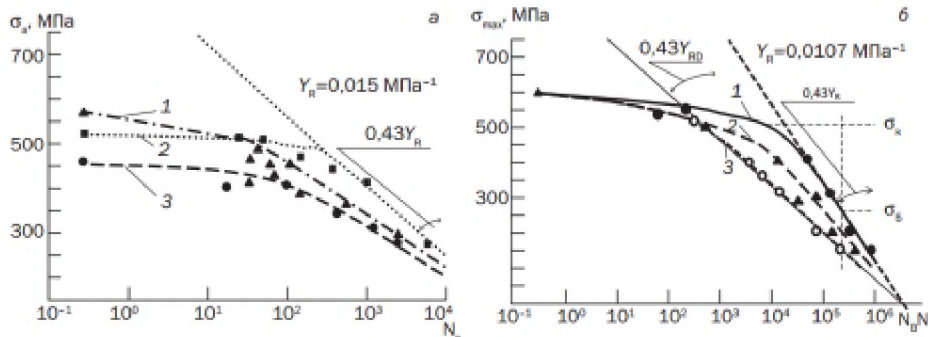
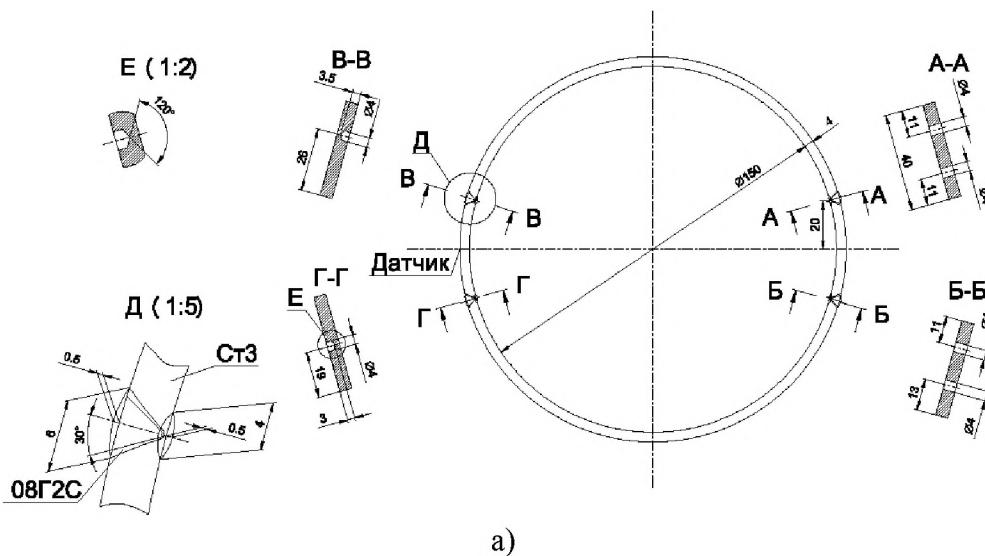


Рисунок 4 – Кривые малоциклового усталости сварных соединений:

а - результаты малоцикловых испытаний различных зон бездефектных сварных соединений стали ВМСт3сп (1-металл углового шва; 2-металл зон термического влияния стыкового соединения; 3-основной металл); б- результаты малоцикловых испытаний стыковых соединений стали 10ХСНД толщиной 20 мм (1-качественное соединение; 2-угловатость 8 мм на длине 1 м; 3-непровар 4 мм) [8]

Дадим подобный анализ экспериментальным данным испытаний, полученным на образцах с отличающейся картиной напряженно-деформированного состояния в виде сжимаемых замкнутых колец, состоящих из сваренных между собой стыковыми швами сегментов [6] (рисунок 5), а также на образцах нахлесточных сварных соединений трех типов, испытанных на растяжение с постоянной скоростью роста нагрузки (рисунок 6). Рассмотрены 5 кольцевых образцов, 4 из которых имели различные искусственные дефекты в сварных швах (отверстия диаметром 4 мм). Результаты регистрации и обработки сигналов АЭ представлены в таблицах 6 и 7 и на рисунке 7. В испытаниях кольцевые образцы не доводились до разрушения, средняя энергия активации процесса их разрушения так же принята равной 113,64 кДж/моль, как у плоских образцов. Суммарный объем сварных швов бездефектного образца составил 6623,52 мм³. В таблице 6 представлены объемы сварных швов для каждого образца с учетом дефектов.





б)

Рисунок 5 - Один из образцов сваренного встык кольца для АЭ испытания при одноосном сжатии (а) и его внешний вид при испытании (б).

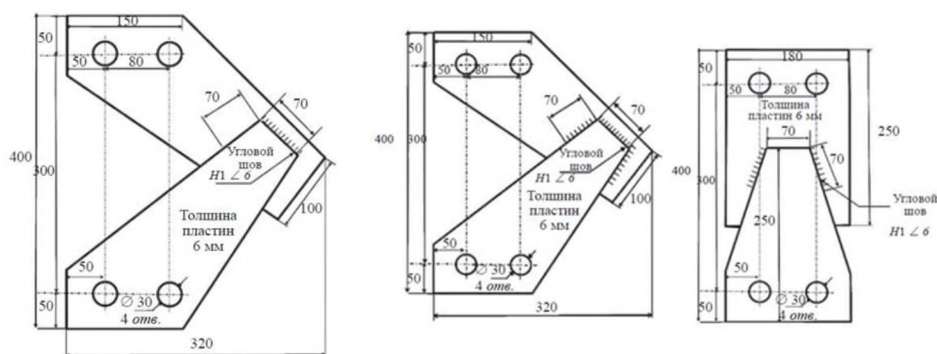


Рисунок 6 - Образцы нахлесточных сварных соединений

Из таблицы 6 видно, что наибольшее значение параметра $k_{AE}C_0$ (наибольшее число источников АЭ) имеет бездефектный образец. Прочностное состояние бездефектного образца существенно неоднородно и проявляется длительным этапом кинетически неоднородного разрушения во время нагружения кольца с возрастающей нагрузкой. Этап однородного разрушения у образца №2 наблюдался с 310-й секунды испытаний. Появление дефекта снижало степень неоднородности состояния, что приводило к доминированию этапа кинетически однородного разрушения кольца (например, у образца №4 однородное разрушение началось на 207-й секунде испытаний).

Таблица 6 – Результаты обработки данных испытаний кольцевых образцов

№	Дефекты образца	Макс. напряжения в свар. швах	$k_{AE}C_0$	Сумм. объем дефектов	Объем св. шва
1	2 сквозных отверстия	259	929	200,960	6422,560
2	Без дефектов	188	94271	0,000	6623,520
3	2 не сквозных отверстия: внутри 3,5 мм, снаружи 3 мм	266	4244	282,600	6340,920
4	2 не сквозных отверстия снаружи: 2,4 мм и 3,2 мм; свищ 1 мм	247	1246	158,256	6465,264
5	2 не сквозных отверстия внутри: 4 мм и 3 мм	268	3887	163,280	6460,240

В отличие от ранее описанных плоских образцов, имеющих технологические дефекты, в рассматриваемых кольцевых образцах дефекты создавались искусственно – путем удаления части «звучащего» объема сварного шва, являющего концентратором напряжений и потенциальной зоной зарождения и развития дефектов. Этим объясняется уменьшение параметра $K_{AE}C_0$ при увеличении объема дефектов (корреляция параметра $K_{AE}C_0$ с объемом сварного шва составила 0,866). Корреляция значений диагностических параметров X_{AE} и Y_{AE} с максимальными напряжениями вблизи дефектов оказалась высокой – 0,925 и 0,941 соответственно, что подтверждает их высокую информативность.

Таблица 7 - Корреляция значений различных прочностных АЭ показателей образцов нахлесточных сварных соединений с величиной расчетных напряжений

Тип обр.	Число от-верстий в шве	Макс. напря-жения (по Ми-зесу), Па	Номин. напря-жения, Па	Число сигна-лов $N_{упр}$	Ср. ам-плитуда $A_{ср}$, дБ	Сред. энергия $E_{ср}^2$, мВ ² х мс	kY_{AE}^* 10^{-6} H^{-1}	Показатель m Ивано-ва-Быкова (ПБ-03-593-03)
1	0	85679	52964	188	65,7	46,9	53	0,16
	1 (в нагр. зоне)	191562	59175	28	64,7	24,4	227	0,67
	1 (в разгр. зоне)	180963	59175	26	71,7	167,2	91	0,26
	2	267166	66163	38	67,6	111,2	349	1,05
	4	272232	73386	8	70,7	1475	387	1,19
2	0	66045	8225	48	69,8	198,4	125	5,78
	3 (в нагр. зоне)	76696	8985	22	67,9	155,6	44	1,14
	3 (в разгр. зоне)	71085	8903	51	67,2	49,7	65	3,67
	6	75532	9800	62	65,8	88,8	78	3,62
	12	77589	11718	26	71,7	174,4	89	2,44
3	0	24504	1701	27	70,1	209,4	19	2,41
	2 (в нагр. зоне)	25591	1823	79	70,1	131,1	11	1,27
	2 (в разгр. зоне)	25464	1823	27	67,4	179,3	15	6,43
	4	25713	1965	41	79,4	782,1	42	2,06
	8	25847	2328	50	63,9	7,2	66	1,74
Козф. кор.			0,93	-0,24	0,23	0,38	0,93	0,48

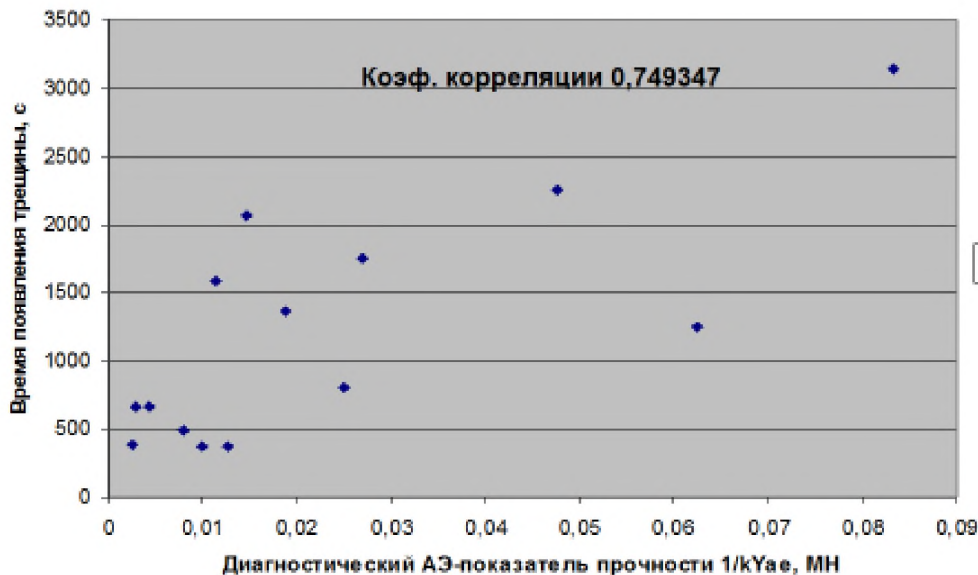


Рисунок 7 - Корреляция расчетных значений диагностического показателя kY_{AE} и момента появления трещины в образцах нахлесточных сварных соединений

Данный подход показал свою эффективность при диагностике состояния сложно нагруженных технических объектов, при оценке геомеханического состояния массива горных пород [9, 10].

Выводы

Рассмотренный подход к обработке акустико-эмиссионной информации позволяет предложить ценные диагностические параметры, что повышает эффективность контроля, точность оценки прочности и остаточного ресурса, развивает представления о происходящих в конструкционных материалах процессах создает предпосылки для детализации исследований влияния различных факторов на свойства конструкционных материалов. Принципы, заложенные в основу создания подхода, имеют универсальное методологическое значение и могут быть использованы при оптимизации технологий неразрушающего контроля состояния объектов различных областей промышленности.

Литература

1. Диагностика технических устройств / Г.А.Бигус, Ю.Ф.Даниел, Н.А. Быстрова, Д.И.Галкин.– М.:Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2014 -615 с, ил.
2. Ivanov V. I. The prime problems of acoustic emission diagnostics of technical devices and constructions // 10th European Conference of Non-Destructive Testing, Moscow 2010, June 7 – 11, http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_07_03.pdf
3. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов” (ПБ 03-593-03), утвержденных постановлением Госгортехнадзора России от 09.06.2003 №77, зарегистрированным в Минюсте России 19.06.2003 г., рег.№ 4778,);
4. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования: Учебное пособие, 2-е изд. испр. и доп, «Лань», СПб, 2012. – 384 с.
5. Носов В.В. Механика композиционных материалов. –Лабораторные работы и практические занятия: Учебное пособие. Изд-во «Лань», СПб, 2013, 2-е изд. перераб. и доп., 240 с.: ил.
6. Носов В.В., Номинас С.В., Зеленский Н.А. Оценка прочности сосудов давления на основе использования явления акустической эмиссии// Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2(219)’ 2015. С. 182-190.
7. Апасов А.М. Исследование сигналов акустической эмиссии при статическом

нагружении плоских образцов из высокопрочной стали.- Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316. № 2.

8. Махутов Н.А., Воробьев А.З., Гаденин М.М. и др. Прочность конструкций при малоцикловом нагружении. – М.: Наука, 1983. -271 с.

9. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. / В.А.Петров, А.Я.Башкарёв, В.И.Веттегрень.–СПб.: Политехника, 1993, 475 с.

10. Носов В.В. Оценка удароопасности участка массива горных пород по результатам регистрации его сейсмоакустической активности// Записки Горного Института. 2015 г, Том 216, с. 62-75.

Практическое занятие № 2.

Методология обеспечения информативности акустико-эмиссионного неразрушающего контроля прочности конструкционных материалов

На сегодняшний день повышение точности и снижение трудоёмкости неразрушающей оценки параметров механического состояния объектов контроля на основе использования явления акустической эмиссии (АЭ) является актуальной задачей. Для ее решения необходимо найти такие диагностические параметры, которые обладают наибольшей информативностью, устойчивостью к дестабилизирующим факторам и могут быть определены непосредственно из результатов акустико-эмиссионных испытаний.

В настоящей работе анализируются результаты экспериментов с применением акустико-эмиссионного контроля, опубликованные в [1]. В работе автор описывает испытания на одноосное растяжение плоских образцов основного металла, а также образцов аналогичных размеров и формы, но имеющих сварной стыковой шов в поперечном направлении. Среди рассмотренных образцов сварных соединений один имел бездефектный сварной шов, а сварные швы остальных 10 образцов имели технологические дефекты в виде непроваров, подрезов, пор, продольных и поперечных трещин. При испытаниях фиксировались первичные параметры акустической эмиссии – суммарный счет N (число импульсов), суммарная амплитуда $\sum A$, средняя амплитуда $A_{ср}$, а результаты представлены в виде графиков временных зависимостей этих параметров. Наибольший интерес в работе представляет вывод относительно связи первичных параметров акустической эмиссии (АЭ) с прочностью образцов: *«Установлено, что в качестве основного информативного параметра при испытании серии образцов необходимо принимать суммарный счет акустической эмиссии».*

Анализ данных результатов производился с целью выработки критериев наступления предразрушающего состояния диагностируемого изделия по полученным в процессе исследования параметрам АЭ и определения корреляционной взаимосвязи диагностических параметров АЭ и характеристик прочности-разрушающей нагрузки образцов. Критерием информативности выбранных диагностических показателей будет коэффициент линейной корреляции, значение которого должно быть максимально приближено к ± 1 .

Для поиска связи в первой части работы используется традиционный статистический подход к поиску корреляционной связи между нагрузкой, прикладываемой к образцам, и суммарным счетом N акустической эмиссии, зарегистрированной при нагрузке 400 кг, 1000 кг, 3000 кг, 5000 кг, 8000 кг. Во второй части работы проводится анализ испытаний на основе информационно-кинетического подхода к изучению процесса разрушения и вытекающей из него микромеханической модели разрушения и временных зависимостей параметров АЭ.

1. Статистический подход

Оценим корреляционную взаимосвязь разрушающей нагрузки и первичного параметра акустической эмиссии - суммарного счета N . Диагностические параметры выбираются интуитивно, оценивается их информативность.

Из рисунков, представленных в [1], были получены значения первичных параметров АЭ при растяжении образцов до нагрузки 400 кг, 1000 кг, 3000 кг, 5000 кг, 8000 кг (таблица 1). Определялся коэффициент корреляции между разрушающей нагрузкой и

суммарным счетом АЭ N при нагружении до каждого из вышеперечисленных значений нагрузки.

Коэффициент корреляции при нагрузке 400 кг равен - 0,56, однако в рассматриваемом временном промежутке из 11 образцов только 3 генерируют сигналы АЭ, поэтому нельзя сделать вывод об информативности параметра N ввиду недостаточности информации. Коэффициент корреляции при нагрузках 1000 кг и 300 кг равны -0,54 и -0,45 соответственно. Далее с увеличением нагрузки прослеживается уменьшение коэффициента: при нагрузке 5000 кг он равен -0,25, при 8000 кг равен -0,35. При дальнейшем увеличении нагрузки в определении коэффициента корреляции не было необходимости, т.к. во всех рассмотренных случаях значение его не соответствуют заявленному условию. Более того, корреляционная взаимосвязь суммарного счета импульсов, зарегистрированных за все время испытаний (до разрушения) и разрушающей нагрузки также оказалась слабой (коэффициент равен 0,157), что опровергает выводы из [1], о которых упоминалось ранее.

Таблица 1

Параметры АЭ при нагрузке 400кг, 1000кг, 3000кг, 5000кг, 8000 кг.

Р = 400 кг				
№	Время	N	ΣA	P
5	200	0	0	13850
6	200	0	0	13850
7	90	0	0	6850
8	400	0	0	8440
9	200	0	0	5538
10	250	0	0	5350
11	500	0	0	11545
12	200	0	0	5680
13	150	1000	0	3920
14	632	2240	300000	410
15	100	90	500	1195
Р = 1000 кг				
№	время	N	ΣA	P
5	450	0	0	13850
6	450	0	0	13850
7	200	100	9000	6850
8	500	300	93333	8440
9	550	10	6167	5538
10	540	36	2180	5350
11	550	240	43200	11545
12	475	56	6000	5680
13	350	200	1500	3920
15	250	1050	76500	1195
Р = 3000 кг				
№	время	N	ΣA	P
5	1350	3	233	13850
6	1350	0	0	13850
7	600	125	34500	6850
8	1600	1000	280000	8440
9	1650	180	20000	5538
10	1620	211	10900	5350
11	1700	300	144000	11545
12	1425	75	8000	5680
13	1050	1700	203000	3920
Р = 5000 кг				
№	время	N	ΣA	P
5	2250	5	470	13850
6	2250	23	1066	13850
7	1000	1400	212000	6850
8	2500	3190	700000	8440
9	2750	500	480000	5538
10	2700	1000	76300	5350
11	2750	1200	288000	11545
12	2850	225	12000	5680
Р = 8000 кг				
№	время	N	ΣA	P
5	3600	4	350	13850
6	3600	46	4800	13850
8	4100	11000	1960000	8440
11	4400	3000	670000	11545
12	3800	450	3400	5680

Рассмотрим более детально зависимости N (рисунок 1) и ΣA (рисунок 2) от разрушающей нагрузки P при нагрузке на образец, равной 1000 кг. Коэффициент линейной корреляции рассматриваемых параметров с разрушающей нагрузкой при этом составил -0,54 для N и -0,22 для ΣA , что говорит о слабой обратной связи.

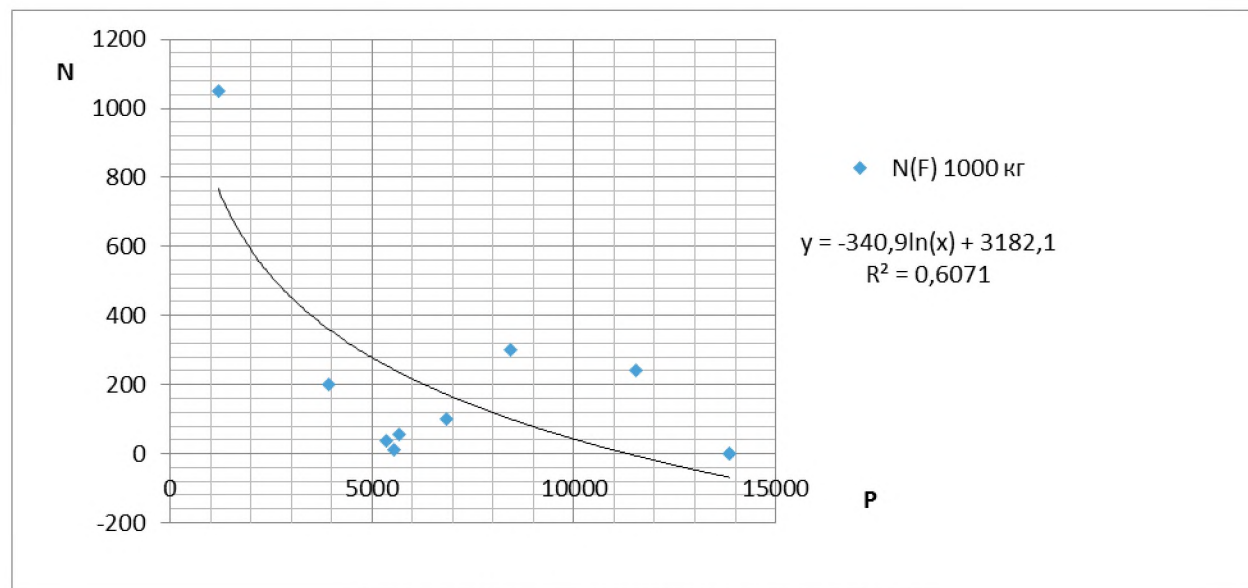


Рисунок 1 – Кривая регрессии для зависимости N от P

Из рисунка 1 видно, что зависимость имеется, но она является косвенной, а точнее линия тренда – логарифмическая. Уравнение регрессии $y = -340,9\ln(x) + 3182,1$ с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,6071$.

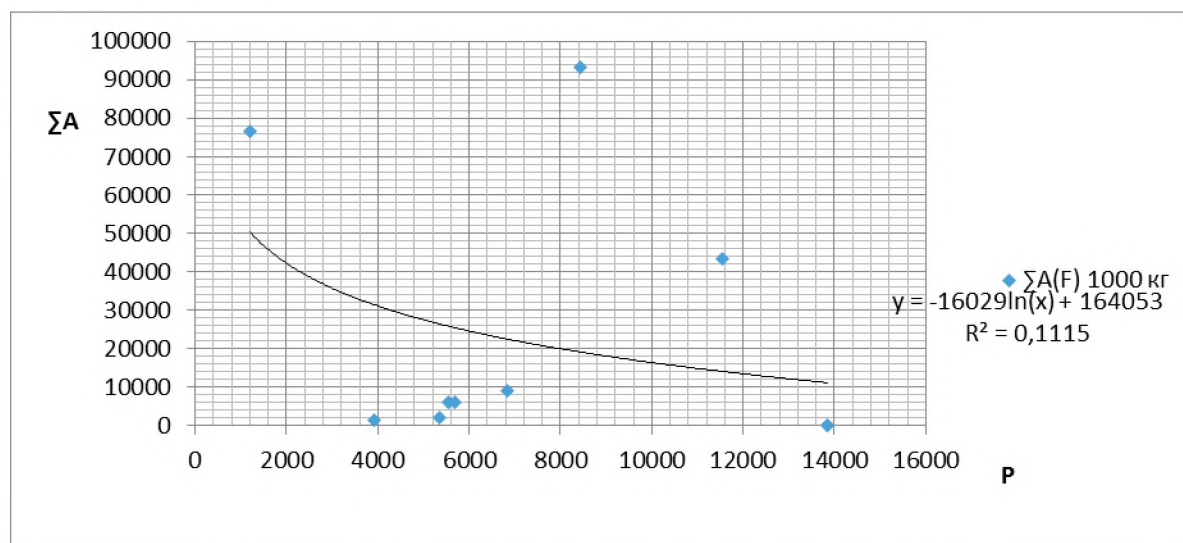


Рисунок 2 – Кривая регрессии для зависимости ΣA от P

Для зависимости $\Sigma A(P)$ (рисунок 2) уравнение регрессии $y = -16029\ln(x) + 164053$ с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,1115$.

Уравнение регрессии позволяет составлять прогнозы на основе статистических данных. Уравнение регрессии — функция, позволяющая по средней величине одного признака определить среднюю величину другого признака, корреляционно связанного с первым. Уравнение регрессии используется для построения линии регрессии. Последняя позволяет без специальных измерений определить любую среднюю величину (y) одного признака, если меняется величина (x) другого признака. По этим данным строится график – линия регрессии, по которой можно определить среднее число импульсов или амплитуды при любом значении максимальной разрушающей нагрузки.

Статистический метод не является эффективным методом поиска связей между параметрами состояния и диагностическим состоянием. Далее рассмотрим микромеханическую модель параметров АЭ, основанную на информационно-кинетическом подходе к изучению процесса разрушения.

2. Микромеханическая модель параметров АЭ

Предложенная микромеханическая модель параметров АЭ [2-7] включает в себя модели процессов, связанных с прочностью, распространением и регистрацией сигнала. Точность оценки технического состояния объекта контроля определяется диагностической ценностью или представительностью выбранного диагностического параметра. Представительность прочностного АЭ-показателя зависит от тесноты связи его с определяющим прочностью процессом, которая в свою очередь зависит от информативности первичных параметров АЭ и статистической устойчивости к помехам регистрации.

$$\xi(t) = k_{AE} C_0 \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} \Psi(\omega) \{1 - \exp[-\int_0^t dt' / \Theta(U_0, \omega(t'))]\} d\omega \quad (1)$$

где ξ – первичный параметр АЭ (число импульсов, суммарная АЭ, суммарная амплитуда сигналов АЭ), t – текущее время; k_{AE} – акустико-эмиссионный коэффициент («звучащий» объем материала); C_0 – начальная концентрация структурных элементов в материале до разрушения; ω – параметр прочностного состояния структурного элемента материала объекта; $\Psi(\omega)$ – функция плотности распределения параметра ω по структурным элементам контролируемого объема V материала; Θ – время разрушения структурного элемента; $\omega_0, \Delta\omega$ – нижняя граница и диапазон рассеяния значений параметра ω .

Акустико-эмиссионный коэффициент вычисляется по формуле

$$k_{AE} = V \iiint_{\Delta t, f, u} \Phi(\Delta t, f, u) du df d\Delta t \quad (2),$$

где $\Phi(\Delta t, f, U)$ – плотность вероятности распределения сигналов АЭ по интервалам Δt (паузы) между ними, амплитуде U и частоте f .

Время разрушения микроэлемента определяется формулой Журкова С.Н.

$$\Theta = \tau_0 \exp[U_0 / (KT) - \omega]$$

где U_0 – энергия активации процесса разрушения, T – абсолютная температура, K – универсальная газовая постоянная.

Параметр прочностного состояния структурного элемента материала объекта $\omega(t)$ вычисляется по формуле

$$\omega(t) = \frac{\gamma \sigma(t)}{KT} \quad (3)$$

где γ – активационный объем, σ – растягивающие напряжения на микроэlemente.

Сложность для оценки прочности и ресурса составляет поиск величины активационного объема γ .

Для неразрушающей оценки стандартных характеристик прочности предложены диагностические АЭ-нанопоказатели X_{AE}, Y_{AE} , определяемые при нагружении различных объектов в различных режимах [2].

Нанопоказатель прочности X_{AE} вычисляется по формуле

$$X_{AE} = \frac{d \ln N_{\Sigma}(t)}{dt} = \frac{\gamma \sigma}{KT} \quad (4)$$

Параметр, связывающий показатель прочности со скоростью роста напряжения Y_{AE} вычисляется по формуле:

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

Как видно из формулы, показатель Y_{AE} связан с величиной активационного объема γ .

Определим нанопоказатель прочности X_{AE} . Он, по сути, является угловым коэффициентом, рассчитываемым на участке кинетически однородного. Для этого сначала определим участок однородного разрушения (рисунки 3 и 4). Затем построим линию тренда, используя встроенную функцию Microsoft Excel «Линия тренда», выбрав при этом линейный тип тренда и отобразив уравнение и коэффициент аппроксимации. Уравнение линии тренда приобретет следующий вид

$$y = Ax + B \quad (6)$$

В выражении (6) коэффициент пропорциональности A и есть искомая величина X_{AE} .

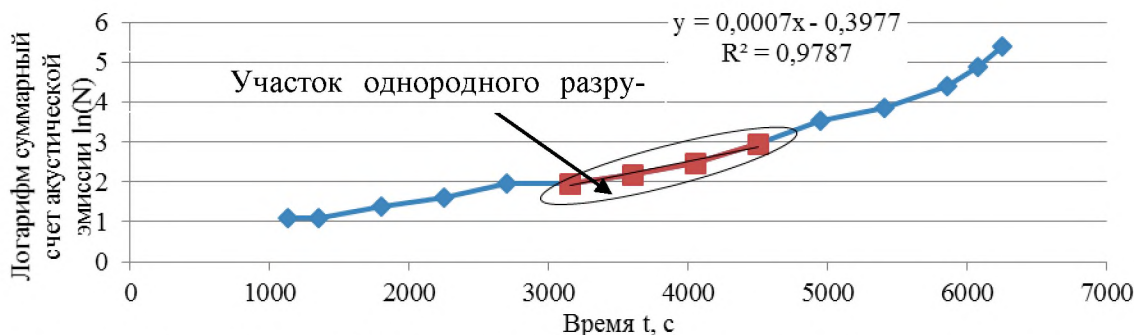


Рисунок 3 – Образец №5. Изменение параметров АЭ во времени при растяжении плоского образца со сварным стыковым бездефектным швом в поперечном направлении в полулогарифмических координатах

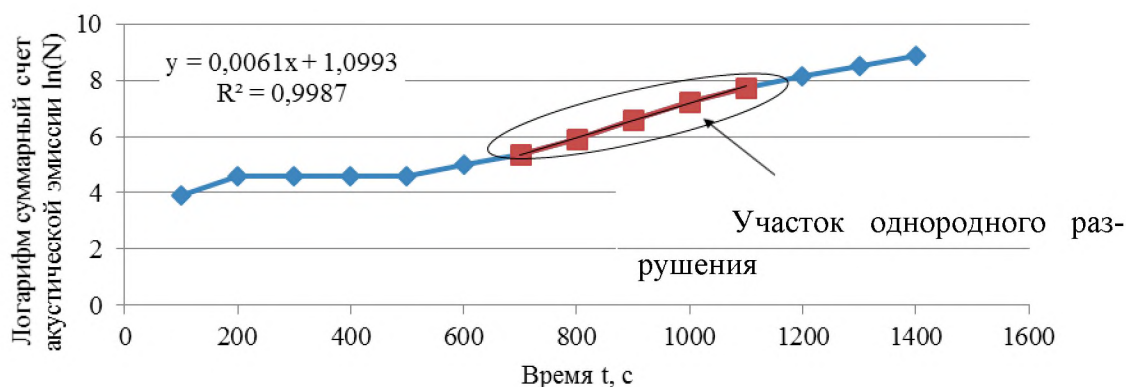


Рисунок 4 – Образец №7. Изменение параметров АЭ во времени при растяжении плоского образца с тремя непроварами и порами диаметром 0,5 мм в сварном стыковом соединении в полулогарифмических координатах

Стоит отметить, что данный коэффициент лучше определять на начальном этапе однородного разрушения. Это связано с тем, что на данном этапе нагрузки еще достаточно низкие и с малой вероятностью могут нанести ущерб испытываемому объекту.

Определим нанопоказатель Y_{AE}

$$Y_{AE} = \frac{X_{AE}}{\sigma} = X_{AE} \cdot \frac{dt}{d\left(\frac{P \cdot g}{A}\right)} = X_{AE} \cdot \frac{A}{g} \cdot \frac{dt}{dP} \quad (7)$$

где A – площадь поперечного сечения активного участка (размеры, данные в [1], равны 10x20 мм), P – нагрузка, прикладываемая к образцу, g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с².

Для образца со сварным стыковым бездефектным швом (образец №5) величина нанопоказателя Y_{AE} по формуле (5) равна

$$Y_{AE} = 0,0007 \cdot \frac{10 \cdot 20}{9,81} \cdot \frac{6250}{13700} = 0,00644 \text{ МПа}^{-1}$$

Для остальных образцов величины Y_{AE} сведены в таблицу 2, кривая регрессии для данного показателя представлена на рисунке 5. Коэффициенты корреляции различных диагностических параметров с разрушающей нагрузкой представлены в таблице 3.

Таблица 2

Параметры АЭ X_{AE} и Y_{AE} при растяжении образцов до максимальной нагрузки				
№ обр.	Вид технологического дефекта	Нагрузка P, кг	X_{AE}	Y_{AE} , МПа ⁻¹
5	Бездефектный сварной шов	13850	0,0007	0,00644
6	Непровар длиной 15 мм	13850	0,0004	0,00371
7	Три непровара и поры d 0.5 мм	6850	0,0061	0,02487
8	Непровар и поры d 0.5...1 мм	8440	0,001	0,0105
9	Четыре поры d 3...5 мм	5538	0,001	0,01045
10	Восемь пор d 0.8мм и микротрещина	5350	0,0015	0,01651
11	Два подреза и поры d 0.01...0.02 мм	11545	0,0009	0,01009
12	Два подреза глубиной 2 мм и трещина по кромке шва, L=3 мм	12000	0,0005	0,00484
13	Трещина вдоль шва L=17 мм	3920	0,0022	0,0157
14	Трещины: поперечная L=4 мм, продольная L=12 мм	410	0,0037	0,11918
15	Трещина: поперечная L=10 мм, продольная L=17 мм и 5 пор	1195	0,0123	0,06269

Таблица 3

Корреляция с максимальной действительной нагрузкой.			
Величина	N	X_{AE} , с ⁻¹	Y_{AE} , МПа ⁻¹
Коэффициент корреляции с макс. нагрузкой (r)	0,157	-0,570	-0,691
Теснота связи	Слабая	Заметная	Заметная

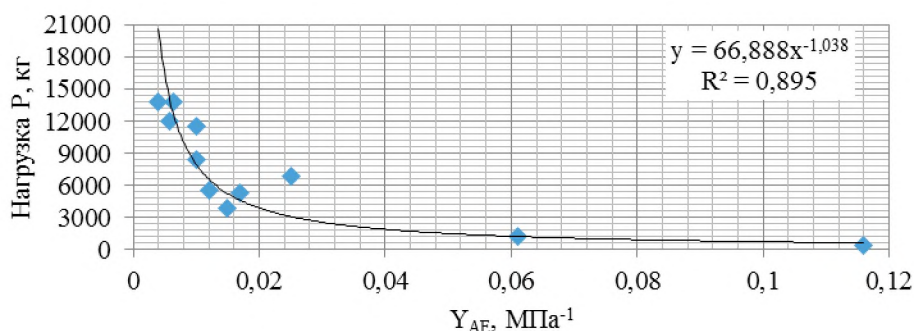


Рисунок 5 – Кривая регрессии для Y_{AE}

Кривая регрессии практически совпадает с уравнением, предлагаемым в работах [2, 5]. Это уравнение позволяет рассчитать разрушающую нагрузку образца

$$F_{PI} = \frac{\left(\frac{U_0}{KT} - \ln\left(\frac{C_0}{C^*}\right) + \ln(\tau_0 F_p' k Y_{AE}) \right)}{k Y_{AE}} = \frac{(M + \ln(\tau_0 F_p' k Y_{AE}))}{k Y_{AE}} \quad (8)$$

где $M = \frac{U_0}{KT} - \ln\left(\frac{C_0}{C^*}\right)$ - константа вида сварного соединения, температуры и частоты ω_N , F_p' - скорость роста нагрузки в разрушающем эксперименте, Н/с; $k = \sigma / F$ - коэффициент пропорциональности между нагрузкой и номинальными напряжениями в образце.

Оценку состояния металлоконструкции в условиях неопределенности напряженного состояния удобно вести с помощью коэффициентов функции $\Psi(\omega)$ плотности распределения значений параметра ω прочностного состояния структурных элементов и безразмерного диагностического параметра W_{AE}

$$W_{AE} = Y_{AE} \cdot \sigma \quad (9)$$

Данный показатель удобен тем, что его величина является безразмерной.

Данный диагностический признак используется в условиях неопределенности фактических напряжений и предыстории нагружения металлоконструкции, а при отсутствии данных принимают $[W_{AE}] = 1$.

Если $W_{AE} \leq 0$, значит состояние конструкции работоспособно, коэффициент запаса статической прочности S более некоторого повышенного значения $S_{пов} = 1,6 \div 5$ (эти значения обратны долям неоднородного разрушения в общей длительности первой стадии и зависят от объекта контроля), превышающего в свою очередь значения нормативно требуемого. При $0 < W_{AE} \leq [W_{AE}]$ значения коэффициента запаса прочности попадают в диапазон $[S] < S < S_{пов}$, где $[S]$ - нормативный коэффициент запаса статической прочности ($[S] = 1,4 \div 4$ в зависимости от объекта контроля и срока его эксплуатации). При $W_{AE} > [W_{AE}]$ работоспособность металлоконструкции принимается ограниченной, нагрузки на диагностируемый объект должны быть снижены не менее чем в $W_{AE} / [W_{AE}]$ раз. При $W_{AE} > [S] \cdot [W_{AE}]$ источник импульсов АЭ следует классифицировать как катастрофически активный, дефект признается опасным и состояние металлоконструкции неработоспособным.

Вывод: Микромеханическая модель параметров АЭ показывает лучшие результаты моделирования, чем статистический подход. Методика проста в применении, универсальна, т. к. диагностические параметры позволяют оценить ресурс и стандартные характеристики прочности различных по структуре и размерам объектов.

Показано информативное преимущество предложенных диагностических показателей для распознавания состояния и оценки ресурса разных вариантов исследуемых в работе [1] образцов по сравнению с первичными параметрами АЭ (суммарным счетом и амплитудой), что подтверждается удовлетворительными значениями коэффициента корреляции.

Библиографический список

1. А.М. Апасов «Исследование сигналов акустической эмиссии при статическом нагружении плоских образцов из высокопрочной стали». Известия Томского политехнического университета. 2010. Т.316. №2. с. 10 .
2. Носов В. В. Диагностика машин и оборудования: Учебное пособие, 2-е изд. испр и доп, СПб: "Лань", 2012.— 384 с.
3. Носов В. В. Автоматизированная оценка ресурса образцов конструкционных материалов на основе микромеханической модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии. – Дефектоскопия, 2014, №12, с 24 – 35.
4. Носов В. В. Механика композиционных материалов.— Лабораторные работы и практические занятия: Учеб. пособие. 2-е изд. перераб. и доп.— СПб: Лань, 240 с.
5. Бураков, Игорь Николаевич. Методика прогнозирования работоспособности сварных соединений металлоконструкций методом акустической эмиссии : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.02.02 / С.-Петербург. политехн. ун-т. - Санкт-Петербург, 2004. - 17 с.

6. Т.Д. Ахметшин, В.В. Носов. Определение ресурса технических объектов на основе идентификации этапа однородного разрушения. - Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2(171)' 2013, с 182 -187
7. В.В. Носов, С.В. Номинас, Н.А. Зеленский. Оценка прочности сосудов давления на основе использования явления акустической эмиссии. - Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2(219)' 2015, с 182 – 190.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ

Введение

Самостоятельная работа направлена на углубление и закрепление знаний, полученных на лекциях, а также выработку навыков самостоятельного приобретения новых, дополнительных знаний, подготовку к предстоящим учебным занятиям и промежуточному контролю.

Самостоятельная работа – обязательная и неотъемлемая часть учебной работы студента, направленная на:

- систематизацию, закрепление, углубление и расширение полученных теоретических знаний и практических умений;
- формирование умений использовать различные информационные источники: нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей, творческой инициативы, ответственности и организованности;
- развитие исследовательских умений.

Самостоятельная работа включает подготовку к практическим занятиям и изучение дополнительных материалов. В методических указаниях описываются действия, которые необходимо выполнить студенту в рамках самостоятельной работы при подготовке к практикуму.

Изучение курса должно обязательно сопровождаться выполнением упражнений и решением задач. Решение задач – один из лучших методов прочного усвоения, проверки и закрепления теоретического материала.

1. Тематика самостоятельной работы

Общие рекомендации

Тематика разделов дисциплины, рекомендуемая для закрепления пройденного материала, представлена теоретическими вопросами и задачами для самостоятельного решения. Задачи студенты решают частью на практических занятиях под руководством преподавателя, частью во внеаудиторное время. При затруднениях с решением задачи студент обращается за консультацией к преподавателю.

Изучать курс рекомендуется по темам, предварительно ознакомившись с содержанием каждой из них по программе. При первом чтении следует стремиться к получению общего представления об излагаемых вопросах, а также отмечать трудные или неясные моменты. При повторном изучении темы необходимо освоить все теоретические положения и подходы к решению практических задач.

Для более эффективного запоминания и усвоения изучаемого материала, полезно иметь рабочую тетрадь (можно использовать лекционный конспект) и заносить в нее основные понятия, новые незнакомые термины и названия, математические зависимости и их выводы и т.п. Весьма целесообразно пытаться систематизировать учебный материал, проводить обобщение разнообразных фактов, сводить их в таблицы. Такая методика облегчает запоминание и уменьшает объем конспектируемого материала.

Изучая курс, полезно обращаться и к предметному указателю в конце книги и к глоссарию (словарю терминов). Пока тот или иной раздел не усвоен, переходить к изучению новых разделов не следует. Краткий конспект курса будет полезен при повторении материала в период подготовки к промежуточной аттестации.

2. Теоретические вопросы для самостоятельной работы

1. Структура автоматизированных систем АЭ контроля включает ...
2. Акустическая эмиссия – это...
3. Акустико-эмиссионный метод диагностирования основан на...
4. Надёжностью называется...
5. Какое из перечисленных понятий не относится к свойству надёжности
6. Безотказность-это свойство изделия...
7. Вероятностью безотказной работы характеризует...
8. Долговечность - свойство изделия...
9. Ресурсом технического объекта называется...
10. Перечислите основные параметры акустической эмиссии...
11. Чем оптимизируется рациональный поиск оптимального варианта решения задач диагностики?
12. Опишите микромеханическую модель временных зависимостей параметров АЭ...
13. Какая система диагностирования опирается на метод акустической эмиссии?
14. Какие факторы повышают амплитуду сигналов АЭ?
15. Какие факторы понижают амплитуду сигналов АЭ?
16. Какие стадии имеет процесс разрушения?
17. Что связывает между собой формула Данегана $N = A_d K^m$?
18. Основная цель акустико-эмиссионного контроля трубопроводов согласно СТО Газпром 2-2.3-328-2009 состоит в том, чтобы...
19. При проведении акустико-эмиссионного контроля во время пневмоиспытаний, согласно СТО Газпром 2-2.3-328-2009, нагружение производится путем ...
20. Основным источником информации о характеристиках усталостной прочности (долговечности) газопроводов, согласно СТО Газпром 2-3.5-252-2008, являются...
21. Сосуд считается выдержавшим гидравлическое испытание, если в процессе его проведения не обнаружено ...
22. Когда впервые была использована кинетическая концепция прочности в области АЭ?
23. Благодаря каким свойствам происходит распространение акустической волны в материале?
24. Какой диагностический признак является простым?
25. Какой диагностический признак является сложным?
26. Приведите основное уравнение надёжности
27. Что такое период нормальной эксплуатации?
28. Что такое период приработки оборудования?
29. В чём проявляется иерархия моделей объекта исследования?
30. Какое свойство модели является основным?
31. Перечислите основные свойства модели в порядке их значимости.
32. Чем измеряется и как определяется информативность диагностического параметра?
33. Структура автоматизированных систем АЭ контроля включает ...
34. Акустическая эмиссия – это...
35. Акустико-эмиссионный метод диагностирования основан на...
36. Надёжностью называется...
37. Какое из перечисленных понятий не относится к свойству надёжности
38. Безотказность-это свойство изделия...
39. Вероятностью безотказной работы характеризует...
40. Долговечность - свойство изделия...
41. Ресурсом технического объекта называется...

42. К характерным направлениям развития средств диагностики не относятся...
43. Чем оптимизируется рациональный поиск оптимального варианта решения задач диагностики?
44. Математическая модель это...
45. Какая система диагностирования опирается на метод акустической эмиссии?
46. По степени абстрагирования диагностические модели не делят на...
47. Какой из этапов рационального диагностирования наиболее информативен?
48. В зависимости от типа используемой модели объекта диагностирования распознавание его состояния производят на основе подхода: ...
49. Методология решения задач диагностики основана на ...
50. По степени обобщения модели объектов диагностирования не разбивают на категории...
51. Основная цель акустико-эмиссионного контроля трубопроводов согласно СТО Газпром 2-2.3-328-2009 состоит в том, чтобы...
52. При проведении акустико-эмиссионного контроля во время пневмоиспытаний, согласно СТО Газпром 2-2.3-328-2009, нагружение производится путем ...
53. Определение допускаемого числа циклов нагружения трубопроводов, согласно СТО Газпром 2-2.3-328-2009, производят по заданным амплитудам напряжений и ...
54. Как называется величина a_N в формуле оценки остаточного ресурса трубопровода?
55. Что означает коэффициент $[N_0]_i$ в формуле оценки усталостных повреждений?
56. Из чего складываются повреждения трубопровода?
57. В качестве параметров технического состояния газопроводов могут быть использованы ...
58. Отличие физической теории надежности от статистической состоит в том, что возможность возникновения в системе отказов рассматривают как ...
59. В рамках объединенного подхода к оценке технического состояния и целостности линейной части магистральных газо-проводов согласно СТО Газпром 2-2.3-253-2009 рекомендованы к применению следующие показатели:
60. Основным источником информации о характеристиках усталостной прочности (долговечности) газопроводов, согласно СТО Газпром 2-3.5-252-2008, являются...
61. Сосуд считается выдержавшим гидравлическое испытание, если в процессе его проведения не обнаружено ...
62. Как называется параметр PQ в формуле расчёта критического коэффициента интенсивности напряжений $K_{IC} = PQ Y_1 / t b^{1/2}$, где t , b – толщина и ширина образца (типа 1), $Y_1 = 0,380[1 + 2,308(2l/b) + 2,439(2l/b)^2]$, где l – длина исходной усталостной трещины?

**Указания к выполнению самостоятельной работы на тему
«ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ СОСУДОВ, РАБОТАЮЩИХ ПОД
ДАВЛЕНИЕМ В ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ НА ОСНОВЕ АКУСТИКО-
ЭМИССИОННОГО (АЭ) КОНТРОЛЯ»**

На примере абсорбера установки аминной очистки газов.

Задание: определить ресурс абсорбера по данным АЭ контроля

Основные сведения.

Комплекс переработки газовых рефлюксов предназначен для смешения рефлюксов первичных и вторичных процессов НПЗ и переработки их в единой технологической линии. Комплекс включает в себя основные установки: аминной очистки газового сырья, фракционирования газов, производства серы и производства водорода – а также ряд вспомогательных, как то смесители и т.д. Блок-схема комплекса, детализированная для расчетов данной работы, приведена на рис. 1.

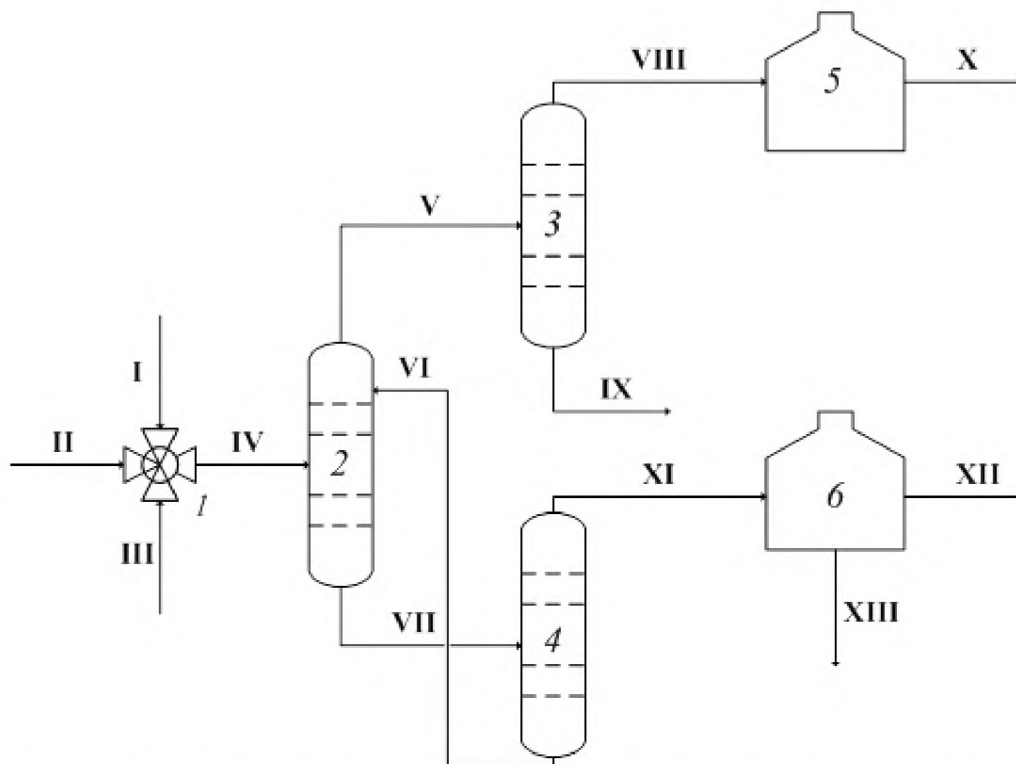


Рисунок 1 - Блок-схема комплекса переработки газовых рефлюксов

1 — смеситель газовых рефлюксов; 2 — абсорбер установки аминной очистки газов; 3 — колонна деэтанзации; 4 — десорбер установки аминной очистки газов; 5 — установка производства H_2 ; 6 — установка производства серы по процессу Клауса

Описание аппаратов.

Смеситель газовых рефлюксов.

В смесителе происходит смешение газовых рефлюксов процессов риформинга, гидроочистки и первичной перегонки нефти. *Газовые рефлюксы* — газообразные смеси, получаемые при разделении продуктов вторичных процессов переработки нефти (крекинг, риформинг и др.). На НПЗ газообразные продукты всех вторичных процессов смешиваются для последующей очистки и фракционирования. Эти газы содержат углеводороды, водород и сероводород.

Абсорбер установки аминной очистки газов.

В абсорбере происходит извлечение сероводорода из смеси углеводородных газов нисходящим потоком раствора диэтанолamina (ДЭА) в воде. Регенерированный раствор ДЭА входит в абсорбер сверху аппарата. В расчетах принимаем, что объемный расход ДЭА составляет 50 л на 1 $нм^3$ сероводорода ($нм^3$, *нормальный кубический метр* — это единица измерения объема газа, соответствующая одному кубическому метру этого газа, измеренному при нормальных условиях — давлении 760 мм рт. ст. и температуре $0^\circ C$). Принимаем, что сероводород извлекается амином полностью, амин не растворяет углеводородные газы. Концентрация ДЭА в водном растворе — 25 % об.

Колонна деэтанации.

В колонне происходит разделение очищенной от H_2S смеси водорода и углеводородных газов на этановую и пропан-бутановую фракции. Примем, что степень конденсации составляет (по массе): для водорода — 0 %; для этана — 5 %; для пропана — 50 %; для бутанов — 90 %. Пропан-бутановая фракция используется в дальнейшем для приготовления одной из марок сжиженного углеводородного газа

Информационно-кинетический подход к оценке прочностного состояния сосудов, работающих под давлением в водородсодержащих средах

Состояние сосудов давления, отработавших длительные сроки, определяется степенью развития дефектов, образовавшихся за время эксплуатации в сварных соединени-

ях и листовых элементах. Помимо большого внимания к дефектоскопии сварных соединений, в последние годы наблюдается повышенный интерес к изучению процесса развития дефектов в листовых элементах типа расслоение, зарождающихся под действием сероводородсодержащей среды. Этот вид повреждения металла вызывается водородом, который образуется в результате электрохимических процессов на поверхности стали при участии сероводорода, углекислого газа и влаги. При эксплуатации оборудования в водородсодержащих средах под действием водорода, повышенных температур и давлений может возникнуть водородная коррозия металла. Она проявляется в образовании отдулин и расслоений металла на различной глубине. Указанные расслоения возникают в результате диффузии атомов водорода в металл, концентрации их в имеющихся микронесплошностях, образования молекул водорода и увеличения его объема. Скопление газообразного водорода во внутренних полостях металла создает огромное давление, поэтому наводороживание может вызвать разрушение стали и в отсутствие внешней нагрузки. Под действием влажного сероводорода разрушаются кровля и верхние пояса бензиновых резервуаров, оборудование газофракционирующих установок, емкостей сжиженного пропана, газоводоотделители установок первичной переработки нефти [1, 2].

Очевидно, разные участки сосудов, эксплуатируемых в сероводородсодержащих средах, подвергаются наводороживанию неодинаково, и по объему одного и того же объекта могут встречаться дефекты типа расслоения на разных этапах их развития. Несмотря на многочисленные исследования в данной области, инструменты влияния водорода на структурно-фазовое состояние и механические свойства металлических материалов еще не до конца установлены. Нерешенные до настоящего времени проблемы ухудшения свойств металлов, насыщенных водородом, а также проблемы создания новых конструкционных материалов для эксплуатации в водородсодержащих средах актуализируют необходимость разработки новых и усовершенствования известных методов контроля дефектов в системах «металл-водород». В настоящее время для неразрушающего контроля конструкционных материалов, подверженных наводороживанию, используются методы измерения электросопротивления, термоэлектродвижущей силы, а также определения скорости затухания рэлеевской акустической волны, позитронной спектроскопии [[3,4]. Водородное охрупчивание металлов идентифицируют по величине модуля Юнга, по предельной прочности и относительному удлинению до разрыва детали. Отмечено, что увеличение концентрации водорода приводит к значительному уменьшению скорости ползучести, увеличению времени разрушения и снижению предельной деформации [5,6,7], на основе измерения микротвердости, термоэдс, вихревых токов высокой частоты [8]. Идентификацию стадий структурных изменений, деформации и разрушения металлов определяют по акустической эмиссии, повышающей свою активность при наводороживании металлов [9,10]. Для решения задачи прогнозирования ресурса предлагается, например [1], процесс развития подобных дефектов условно делить на четыре периода: I – инкубационный период (время накопления водорода до момента создания максимальных объемных напряжений, когда еще не образуется трещина); II – зарождение трещин и увеличение их площади за счет роста и объединения; III – образование вздутия (блистера) при достижении площади расслоения и давления внутри полости критических значений; IV – распространение расслоения по оставшемуся неповрежденному сечению стенки с выходом на поверхность или с выходом на поверхность путем соединения расслоений, залегающих параллельно на разных глубинах, или путем разрушения стенки в месте максимального вздутия блистера. Однако оценка длительности периодов в работе не определена, связать параметры контроля со степенью опасности дефектов или ресурсом реальных объектов до сих пор не удаётся.

Описание информационно-кинетического подхода

Оценка ресурса длительно работающих технических объектов в настоящий момент ведётся преимущественно расчётами на выносливость или методами механики развития трещин, включающими неопределённые характеризующие индивидуальность состояния объекта эмпирические коэффициенты [11]. В попытке повышения точности оценки на основе неразрушающих методов контроля из-за метрологической и прочностной неод-

нородности также сталкиваются с неопределённостью статистического подхода и необоснованностью эталонной аналогии. Перспективным здесь представляется подход, опирающегося на микромеханическую модель параметров АЭ, объединяющей статистический и физический подходы к диагностированию, а также дополнительно «черпающий» информацию на макро-, микро-, и нано-уровнях прочностных исследований для обоснования выбора ценных диагностических АЭ показателей. По результатам предварительных исследований АЭ, описанных в [12,13], сделаны следующие выводы:

1. Характеристики прочности, параметры процесса разрушения и АЭ материалов зависят от результата конкуренции одновременно протекающих в материале процессов разрушения и пластического деформирования структурных элементов.

2. Ресурс большинства длительно нагруженных материалов, конструкций и сооружений определяется процессом микротрещинообразования, протекающим в условиях упругого деформирования.

3. Разрушение состоит из двух стадий - мелкодисперсного (рассеянного по объёму объекта либо локально сгруппированного в области дефекта) накопления концентрации микротрещин, и укрупнённого локализованного разрыва сплошности (образования или роста трещины), протекающего упруго либо пластически.

4. Первая стадия состоит из двух этапов с отличающимися кинетическими и диссипативными свойствами: кинетически неоднородного, связанного с разрушением равнопрочных структурных элементов с повышенными диссипативными свойствами, и кинетически однородного микротрещинообразования с умеренными диссипативными свойствами, достаточными для релаксации напряжений.

5. Акустическая эмиссия упруго деформированных материалов связана, главным образом, с процессом микротрещинообразования. Количество сигналов от пластической деформации перенапряжённых структурных элементов относительно невелико. Для уменьшения их дестабилизирующего влияния на результаты прогнозирования ресурса следует применять частотную и амплитудную фильтрации.

6. Неоднородность прочностного состояния сложно нагруженных объектов связана с неоднородностью поля механических напряжений и со структурной неоднородностью материала шва.

7. У образцов, выполненных без ярко выраженных концентраторов, этап неоднородного разрушения наиболее длителен (до 60% от длительности первой стадии). У образцов с дефектами этап кинетически неоднородного разрушения не превышает 30 %. После образования трещины образцы разрушаются однородно, как с концентратором напряжений.

8. Разрушение образцов с концентратором напряжений протекает кинетически однородно. После образования трещины происходит её развитие с разгрузкой напряжённых зон сварного шва и пластической перестройкой структуры материала.

9. Влияние неразвивающейся трещины на процесс разрушения происходит упруго (без длительных сигналов АЭ) и способствует снижению степени неоднородности разрушения.

10. Следствием прочностной неоднородности состояний структурных элементов является снижение при нагружении амплитуды сигналов и невоспроизводимость активности АЭ при повторном нагружении (эффект Кайзера).

11. Латентность АЭ при повторном нагружении конструкций информативна и свидетельствует об отдалённости момента накопления критической концентрации микротрещин вблизи концентратора и об отсутствии в материале соединения опасных дефектов.

12. Предложены ценные диагностические показатели X_{AE} , Y_{AE} , W_{AE} и сформулированы диагностические признаки состояния сложно нагруженных объектов контроля, способные стать базой создания методики оценки работоспособности объектов, функционирующих в условиях не-определённости напряжённо-деформированного и структурного состояния.

С позиции микромеханической модели прогнозирование ресурса безопасной экс-

платации по критерию циклической прочности будет сводиться к прогнозированию момента t^* накопления критической концентрации микротрещин C^* . На этапе однородного разрушения временная зависимость концентрации $C(t)$ микротрещин описывается законом

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

где C_0 – начальная концентрация структурных элементов в материале до разрушения, θ_{cp} – среднестатистическое время ожидания разрушения одного структурного элемента, задаваемое формулой Журкова [14], при начальном условии $C(0)=0$.

Из преобразования данного соотношения с учетом формулы Журкова [4] следует, что при выдержке под постоянной нагрузкой, когда напряжения σ постоянны, временная зависимость концентрации образующихся микротрещин описывается выражением

$$C(t) \approx \frac{C_0 t}{\tau_0} \exp\left(\frac{\gamma\sigma - U_0}{KT}\right), \quad (2)$$

где τ_0 – период атомных колебаний (относительно стабильная величина примерно равная 10^{-13} с); U_0 – энергия сублимации (энергия отрыва атома при переходе тела из твердого состояния в газообразное); γ – структурно-чувствительный параметр; σ – действующее напряжение; t – текущее время; K – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Аналогично (2), при равномерном нагружении в режиме постоянной скорости $\dot{\sigma}$ роста напряжений, когда $\sigma = \dot{\sigma}t$,

$$C(t) \approx \frac{C_0 KT}{\tau_0 \gamma \dot{\sigma}} \exp\left(\frac{\gamma \dot{\sigma} t - U_0}{KT}\right), \quad (3)$$

Параметры τ_0 и U_0 наиболее консервативны и слабо зависят от состояния структуры, определяются характеристиками межатомного взаимодействия структурного элемента; значения параметра γ являются характеристикой наноструктуры материала, которая слабо чувствительна к его химической природе, однако совместно с напряжениями σ параметр γ отражает прочностную индивидуальность структурного элемента, а входящий в формулу Журкова параметр $\gamma\sigma/(KT)$ фактически является параметром его прочностного состояния.

Согласно микромеханической модели при корректных АЭ испытаниях первичный параметр АЭ (например, суммарное число зарегистрированных импульсов N_{Σ}) будет пропорционален концентрации микротрещин и на этапе однородного разрушения описываться временной зависимостью

$$N(t) = k_{AE} C(t) = k_{AE} \frac{C_0 KT}{\tau_0 \gamma \dot{\sigma}} \exp\left(\frac{\gamma \dot{\sigma} t - U_0}{KT}\right), \quad (4)$$

где k_{AE} – акустико-эмиссионный коэффициент («звучащий» или акустически активный объем, часть контролируемого объема объекта контроля, генерирующая регистрируемые аппаратурой АЭ сигналы, прошедшие амплитудную, частотную и временную фильтрации). Микромеханическая модель позволяет определить параметр γ непосредственно из АЭ эксперимента, т.к. она связывает первичную АЭ информацию с параметрами повреждаемости. Из (4) следует, что при постоянной и известной скорости роста напряжений, когда этап однородного разрушения будет характеризоваться прямоли-

нейным участком на графике зависимости числа импульсов от напряжений $\ln N_{\Sigma}(\sigma)$, представленной в полулогарифмических координатах.

При оценке выносливости сосудов и трубопроводов расчеты базируются на аппроксимированных кривых усталости и диаграммах предельных напряжений, построенных по результатам разрушающих испытаний на усталость стандартных образцов и описываемых уравнениями с эмпирическими коэффициентами [15]. На рисунке 1 представлены варианты аппроксимации кривой усталости и иллюстрация повышения гамма-процентного ресурса на основе повышения точности его прогнозирования. В частности, для кривых, выпрямляющихся в полулогарифмических координатах, и описываемых уравнением

$$\sigma_a + K \lg N = \sigma_{-1} + K \lg N_0$$

основными параметрами кривых усталости являются предел выносливости σ_{-1} и угловой коэффициент $k = \operatorname{tg} \alpha = 1 / 0,43 Y_R$, где $Y_R = \gamma / (KT)$ – параметр прочностного состояния эталонного образца из материала диагностируемого объекта, представляет собой угловой коэффициент кривой усталости Журкова (рис. 1 б). На параметры кривых усталости оказывают влияние большое число факторов, что при условий разрушения в водородосодержащих средах создает проблему оценку выносливости реального объекта ввиду несоответствия эталонным образцам. Более обоснованное определение параметров кривых усталости может быть получено посредством определения прочностных параметров представительных структурных элементов отработавшего в сложных условиях реального объекта, что и предлагается сделать с позиций рассматриваемого подхода. Предпосылкой такой возможности является то, что диагностический показатель Y_{AE} , являющийся угловым коэффициентом прямолинейного участка зависимости $\ln N_{\Sigma}(\sigma)$ и показатель Y_R кривой усталости, определяются по единой формуле

$$Y_R = d \ln N / d \sigma = Y_{AE} = d \ln N_{\Sigma} / d \sigma = \gamma / (KT), \quad (5)$$

объединяющей макро- (по масштабу визуального контроля количества N циклов до разрушения), микро- (по масштабу АЭ контроля и определению числа N_{Σ} импульсов АЭ), и нано- (по масштабу величины γ составляющей несколько нм³) уровнях прочностных исследований.

По параметрам однородного разрушения участка временной зависимости логарифма числа импульсов АЭ $\ln N_{\Sigma}(t)$ определяются другие диагностические параметры

$$X_{AE} = \frac{d}{dt} \ln(N_{\Sigma}(t)) = \frac{\gamma \dot{\sigma}}{KT}$$

$$W_{AE} = d \ln N_{\Sigma} / d K_H = \gamma \sigma / (KT), \quad (6)$$

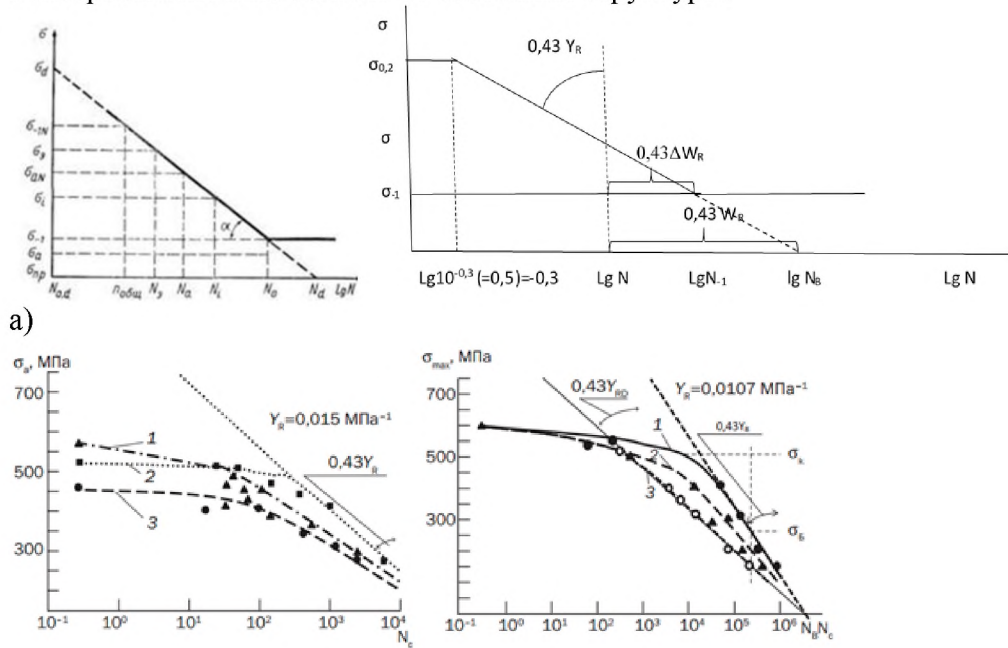
где K_H – коэффициент нагрузки (отношение диагностической нагрузки к рабочей)

Прогнозирование ресурса N диагностируемого объекта по критерию циклической прочности предлагается [16] вести на основе уравнения кривой усталости Журкова

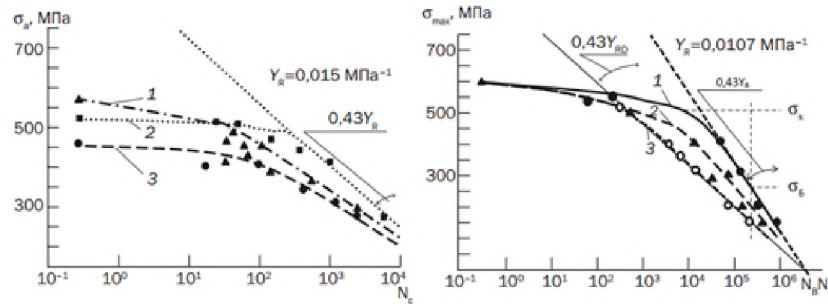
$$N = \frac{N_B}{\exp\left(\frac{\gamma \sigma}{KT}\right)}, \quad (7)$$

где $N_B = \omega_N \frac{C^* \tau_0}{C_0} \exp\left(\frac{U_0}{KT}\right)$ – константа материала, температуры и частоты ω_N его нагружения, определяется по результатам циклических испытаний образцов, построения кривой усталости и экстраполяции линейного участка зависимости $\sigma(\lg N_C)$ на ось $\lg N_C$ (рис. 1 б), $(\sigma(\lg N))$ на ось $\lg N$ рис. 1 в). Входящие в формулу параметры τ_0 и U_0 наиболее

консервативны и не зависят от состояния структуры.



а)



б)

в)

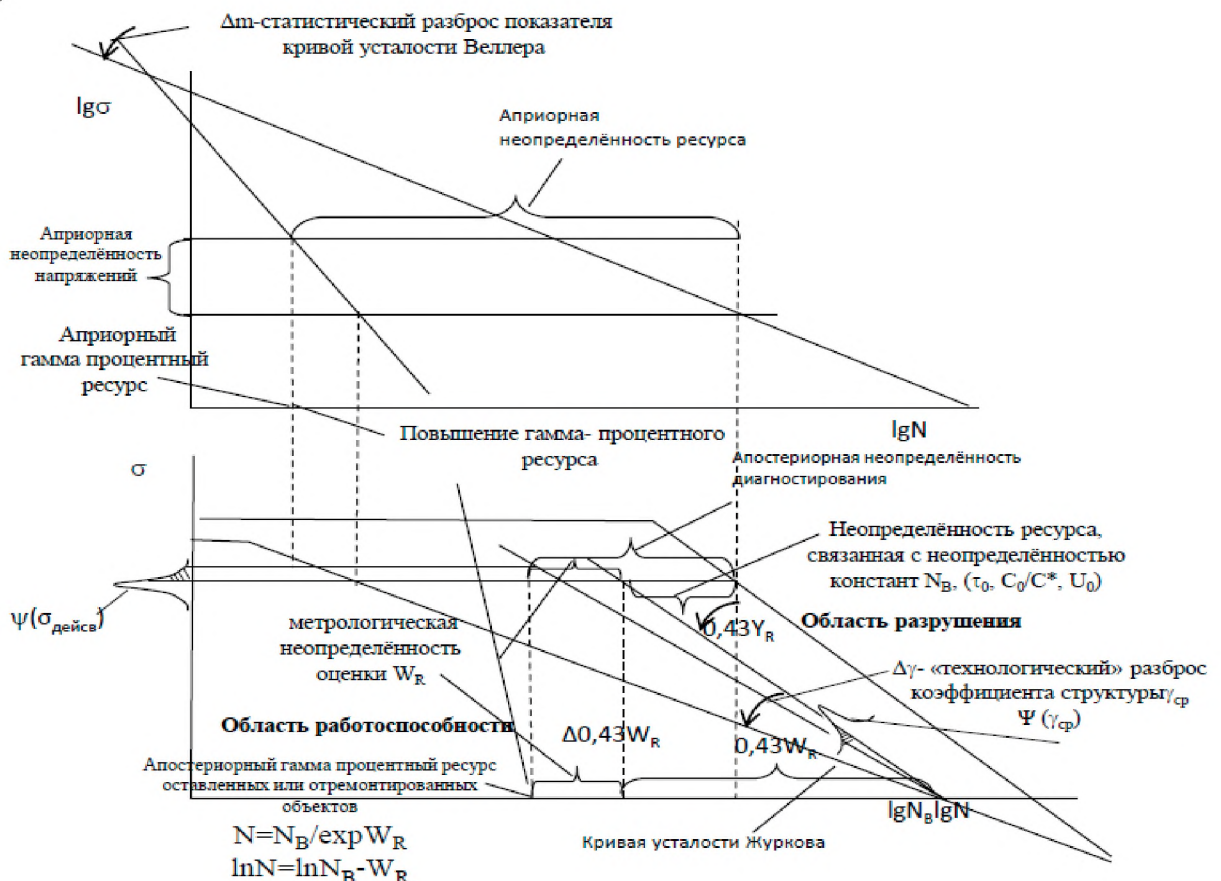


Рисунок 1 – а) Кривая усталости в полулогарифмических координатах и ее характеристики, используемые при расчете ресурса

б) Кривые малоциклового усталости сварных соединений (по данным [17]: слева – результаты малоцикловых испытаний различных зон бездефектных сварных соединений стали ВМСтЗсп (1 – металл углового шва; 2 – металл зоны термического влияния стыкового соединения; 3 – основной металл); справа – результаты малоцикловых испытаний

стыковых соединений стали 10ХСНД толщиной 20 мм (1 – качественное соединение; 2 – угловатость 8 мм на длине 1 м; 3 – непровар 4 мм)

в) Кривые усталости материалов и иллюстрация повышения гамма-процентного ресурса на основе повышения точности его прогнозирования за счёт использования диагностических параметров Y_{AE} и W_{AE} .

Формула (7) расчёта ресурса технического объекта через оперативно, неразрушающим путём и определяемые на конкретном объекте параметры является одним из результатов подхода, получившим теоретическое и экспериментальное обоснование.

Приблизительно величину N_B можно определить по формуле

$$N_B = \exp(\ln N_G + \sigma_R Y_R) \quad (8)$$

где $N_G = 2 \cdot 10^6$ – абсцисса точки перелома кривой усталости, m – показатель степени кривой усталости, σ_R – предел выносливости при заданном коэффициенте асимметрии R цикла рабочих напряжений, при отсутствии данных принимаем $R = -1$ (двухфазные ферритно-мартенситные стали удовлетворительно свариваются методом точечной сварки, предел выносливости при знакопеременном изгибе составляет для сварного шва и основного металла ($\sigma^* = 550$ МПа, соответственно 317 и 350 МПа, т.е. 50 и 60% σ^* основного металла); $Y_R = \gamma / (KT)$ – параметр прочностного состояния эталонного бездефектного образца из материала диагностируемого объекта, представляет собой угловой коэффициент кривой усталости типа Журкова в полулогарифмических координатах (для стали 09Г2С равен $\approx 0,035-0,046$ МПа⁻¹).

Значения Y_R могут быть определены приближённо по приводимым в справочной литературе данным показателей степеней кривых усталости m и m_N . В частности, для многоциклового усталости с описывающим её кривую уравнением $\sigma^m N_C = \text{const}$

$$Y_R = m / \sigma \quad (9)$$

При расчёте на малоцикловую усталость с описывающим её кривую усталости уравнением $\sigma N_C^{m_N} = \text{const}$

$$Y_R = 1 / \sigma m_N \quad (10)$$

Для малоциклового усталости стали и сварных соединений средние значения $m_N = 0,3$, $\sigma = 300$ МПа, $Y_R = 1 / (0,3 \cdot 300) = 0,011$ МПа⁻¹.

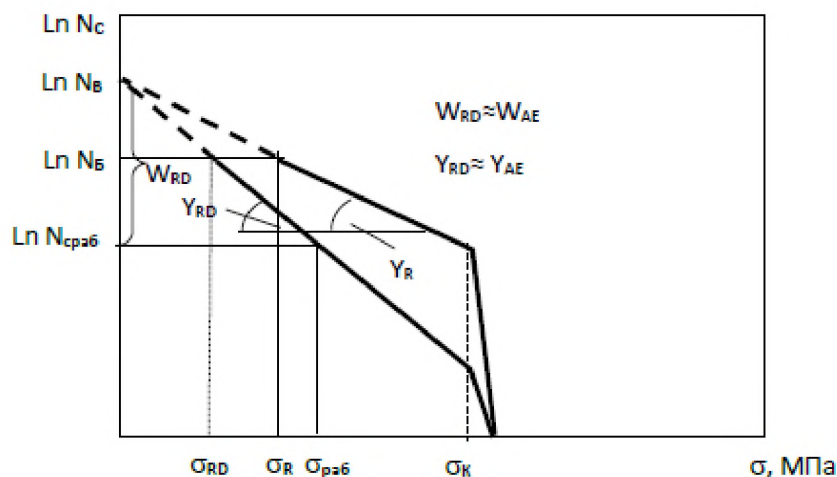
Рисунок 2 демонстрирует связь параметра $Y_R \approx Y_{AE}$ с ресурсом.

Диагностическая ценность прочностных показателей

Условия применения Параметр	Лабораторные, стендовые испытания		Промышленные с определённым НДС		Промышленные с неопределённым НДС		Принцип определения, связь с ресурсом
	Инф.	Конр.	Инф.	Конр.	Инф.	Конр.	
$W_K, A_{пол}$	+	+	+	-	-	-	ВК, сопромат, МКЭ, кривые усталости, ГЛСП
Y_{AE}	+	+	+	+	+	-	АЭ, ММР, $dln\dot{\epsilon}/d\sigma$
$kY_{AE}, 1/kY_{AE}$	+	+	+	+	-	+	АЭ, ММР, $dln\dot{\epsilon}/dF$
W_{AE}	+	+	+	+	+	+	АЭ, ММР, $dln\dot{\epsilon}/dK_H$

Инф. - информативность (способность уменьшать неопределённость);
 Конр. - контролепригодность (способность быть определённым);
 ВК - визуальный контроль;
 МКЭ - метод конечных элементов;
 ГЛСП - гипотеза линейного суммирования повреждений;
 ММР - микромеханическая модель разрушения;
 F-нагрузка, K_H - коэффициент нагрузки.

а)



б)

Рисунок 2 – а) Диагностическая ценность показателей прочности и их связь с ресурсом ($A_{пол}$ – полезная площадь, W_K – момент сопротивления сечения); б) Графическая интерпретация связи параметров Y_{AE} и W_{AE} с ресурсом, N_c – число циклов до разрушения.

Пример реализации подхода к оценке состояния сосуда давления

Для демонстрации описанной выше методики прогнозирования ресурса технических объектов со структурной неоднородностью приведем пример АЭ испытаний абсорбера очистки сероводорода раствором моноэтаноламина, детально описанных в [1, пример 3].

На рисунке 3 показаны фрагмент аппарата и участки, на которых дополнительно проводился УЗК. Хронология развития дефектов на участках №1,2 и результаты УЗК представлены в таблицах 1 и 2.

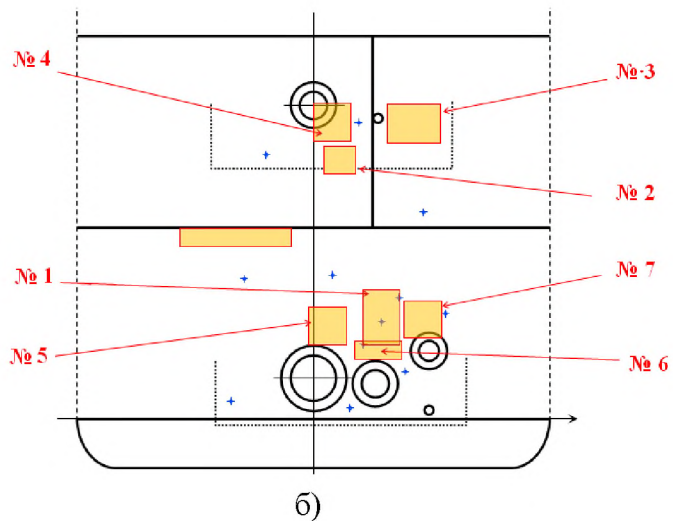
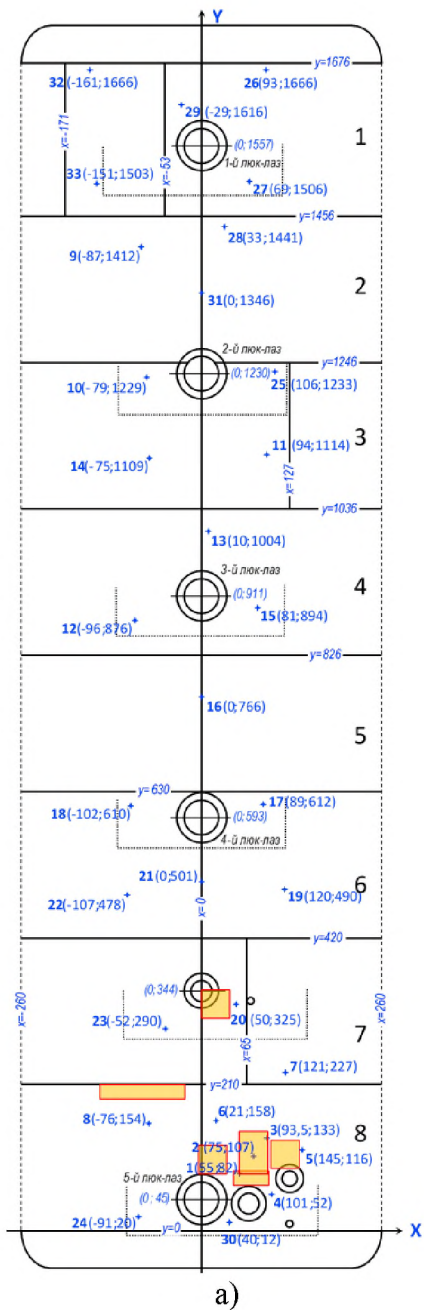


Рисунок 3. Номера поясов, номера и координаты расположения ПАЭ, (а) номера и расположения участков дополнительного ультразвукового контроля (б) абсорбера очистки сероводорода

Таблица 1 – История развития дефектов

Участок	Метод контроля	1996	1999	2007	2010
№1	УЗК	одиночные точечные несплошности	–	нерегулярная несплошность на глубине 10..14 мм (пример на рисунке 4)	2 расслоения на разных уровнях
	АЭ	высокая АЭ активность	снижение АЭ активности в сравнении с 1996г	–	высокая АЭ активность в течение всего времени нагружения
№2	УЗК	–	одиночные точечные несплошности	нерегулярная несплошность на глубине 16..120 мм	Регулярная несплошность
	АЭ	высокая АЭ активность	–	–	высокая АЭ активность в течение всего времени нагружения

Таблица 2 – Дефекты, выявленные автоматическим УЗД в 2010 году

Участок	Дефект	Глубина (мм)	Площадь (м ²)	Донный сигнал
№1	несплошность	9,0-12,0	0,24	отсутствует
№3	отдельные несплошности	10,9-21,0	-	присутствует
№4	отдельные несплошности	8,5-20,0	-	присутствует
№5	несплошность	9,0-12,0	0,16	отсутствует
№6	несплошность	9,0-12,0	0,10	отсутствует
№7	несплошность	9,0-12,0	0,16	отсутствует

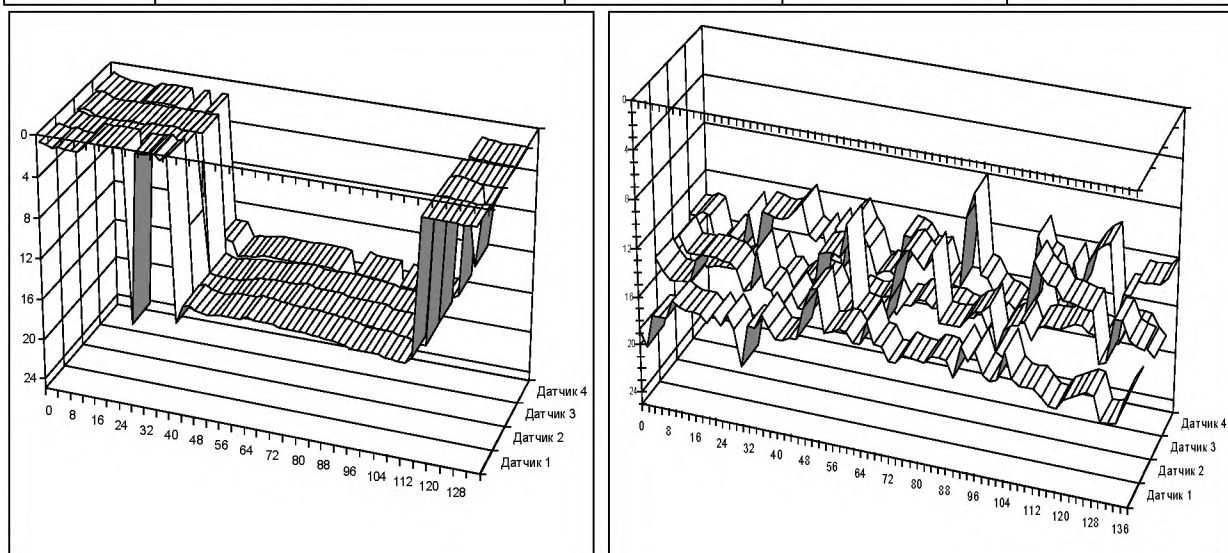


Рисунок 4. Пример УЗ-картины дефектов, выявленных на участках №№1,2 в 2007 г. и на участках №№3,4 в 2010 г. с разным уровнем АЭ активности: (а) – в районе сформировавшегося блистера (регулярная структура, низкая АЭ активность); (б) – в районе скопления относительно небольших несплошностей или других структурных неоднородностей (иррегулярная структура, высокая АЭ активность).

Наблюдение за характером развития дефектов и их АЭ поведением при гидравлических испытаниях на участках №1 и №2, как видно из таблицы 1, началось в 1996 г. Другие же участки, показанные на рисунке, были выделены для контроля лишь в 2010 г. Для регистрации сигналов АЭ использовалась системы LOCAN AT, AMSY4, AMSY5. Однако знание хронологии развития расслоений в данном объекте позволит провести корреляцию результатов анализа диагностической информации между различными зонами.

Первичная АЭ информация, полученная при гидроиспытаниях абсорбера в 2010 г., содержала в себе данные о времени, амплитуде и количестве выбросов каждого зарегистрированного импульса, а также о номерах датчиков, последовательно регистрировавших каждое АЭ событие. В течение гидроиспытаний было зарегистрировано 4126 событий, каждое из которых сопровождалось сигналами на 4-7 датчиках (всего 23245 сигналов). График нагружения абсорбера внутренним избыточным давлением представлен на рисунке 5.

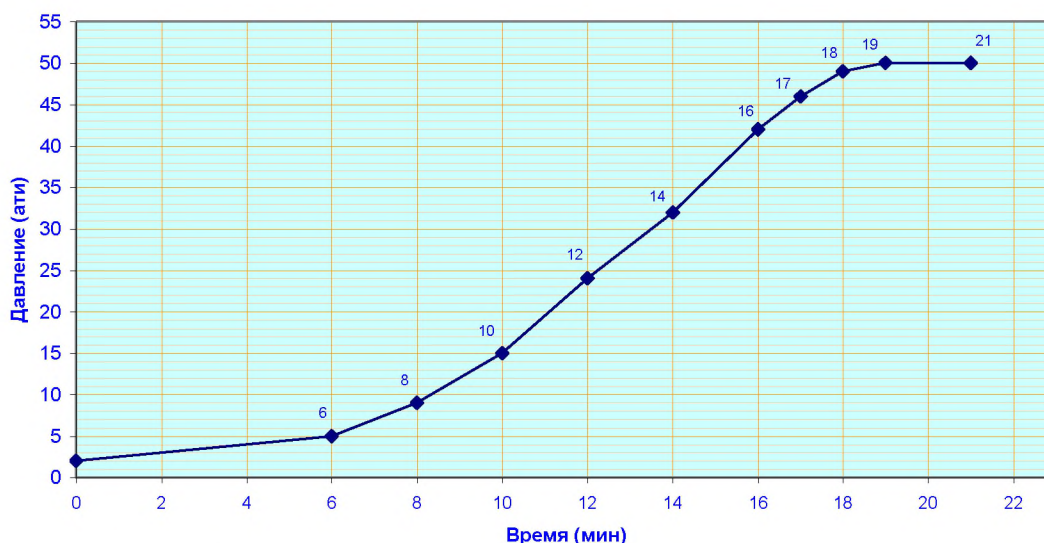


Рисунок 5 – График нагружения при гидроиспытаниях аппарата

Для проверки достоверности оценок с позиций данного подхода сначала осуществлялось сопоставление результатов оценки с уровнем пояса абсорбера на основе анализа результатов зонного контроля, когда идентификация источников проводится по зонам, связываемым с номерами поясов с допущением, что сигналы, зарегистрированные датчиком, расположенным на определенном поясе, вызваны источниками того же пояса абсорбера (табл. 3). Таким образом, зарегистрированные сигналы группировались по поясам, по (6) определялись значения диагностического параметра X_{AEcp} для каждого пояса в целом, которые сопоставлять с уровнем (номером, начиная с верхнего) определённого пояса. В уравнении (4) первичным диагностическим параметром выступало не только количество зарегистрированных импульсов, но и относительная амплитуда сигналов, суммарное число выбросов и различные сочетания первичных АЭ параметров.

При обработке первичной информации по каждому каналу был выделен временной интервал с 600-й по 800-ю секунды нагружения (рисунок 5), давление при этом равномерно возрастало с 1,5 МПа до 2,9 МПа, временная зависимость числа импульсов для определения параметра X_{AE} представлена на рисунке 6. Результаты расчета X_{AEcp} , изменявшиеся в пределах от $0,0000612 \text{ с}^{-1}$ до $0,00165 \text{ с}^{-1}$ коррелировали с номером пояса (рисунок 7) и сведены в обобщающую таблицу 4 с указанием коэффициентов корреляции с номером пояса без учёта пояса №8, как явно выделяющегося ($X_{AEcp}=0,01154 \text{ с}^{-1}$).

Таблица 3. Результаты регистрации и расчёта диагностических АЭ показателей по различным каналам ПАЭ.

№ ПАЭ	N _Σ сум	X _{АЭ} 10 ³ , с ⁻¹	W _{АЭ} раб	S _{СТ}	Суммарная амплитуда, дБ	Средняя амплитуда, дБ
1	2116	7,75	5,1	2,8	111831	52,8
2	1510	7,21	4,8	3	72904,4	48,3
3	2116	4,94	3,3	4,4	133655,1	51,4
4	1809	7,74	5,1	2,8	100894,3	55,8
5	1480	6,86	4,5	3,2	77334,2	52,3
6	1377	5,4	3,6	4	64941,3	47,2
7	62	0	0	>30	2617,3	42,2
8	603	4,8	3,2	4,5	29563,1	49
9	149	0	0	>30	7594,1	51
10	375	0,716	0,47	30,6	19800,9	52,8
11	446	0,87	0,58	25,2	23370,3	52,4
12	350	0,796	0,53	27,5	17715,1	50,6
13	433	0,761	0,5	28,8	22070,4	51
14	516	0,81	0,54	27	26735,4	51,8
15	424	0,72	0,48	30,4	21691	51,2
16	294	1,11	0,74	19,7	14383,8	48,9
17	498	1,59	1,06	13,8	26501,5	53,2
18	527	1,64	1,09	13,4	27338	51,9
19	641	0,855	0,57	25,6	30859,4	48,1
20	1241	2,5	1,7	8,76	70678,5	57
21	968	1,03	0,69	21,3	47827,9	49,4
22	680	1,06	0,7	20,6	33137,3	48,7
23	664	0,8	0,53	27,4	31615,9	47,6
24	1049	3,3	2,2	6,6	51910	49,5
25	390	0,72	0,48	30,4	19941,7	51,1
26	57	0	0	>30	2806	49,2
27	118	0	0	>30	6177,8	52,3
28	24	0	0	>30	1120,6	46,7
29	83	0	0	>30	4447,7	53,6
30	1461	9,7	6,4	2,2	73788	50,5
31	132	0,82	0,54	26,7	6556,2	49,7
32	66	0	0	>30	3388,2	51,3
33	101	0,306	0,2	71,5	4992,2	49,4

По поясам абсорбера были определены среднее количество сигналов, средние и максимальные значения X_{AE} , Y_{AE} , минимальный коэффициент запаса статической прочности по (12) и минимальный и максимальный остаточные ресурсы, после чего найдены коэффициенты корреляции параметров с номером пояса.

$$S_{СТ} = \frac{\sigma_{ви}}{\sigma_{раб}} \approx \frac{\sigma_{в} Y_R}{\sigma_{раб} Y_{AE}}, \quad (12)$$

где $\sigma_{ви}$ – предел прочности материала изделия, $\sigma_{в}$ – предел прочности образца материала изделия, $\sigma_{раб}$ – номинальное значение рабочего напряжения в поясе.

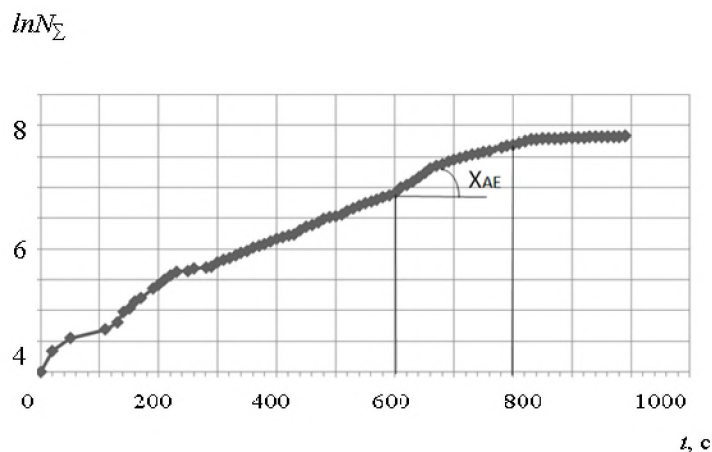


Рисунок 6 – Временная зависимость числа импульсов в полулогарифмических координатах, определение параметра X_{AE}

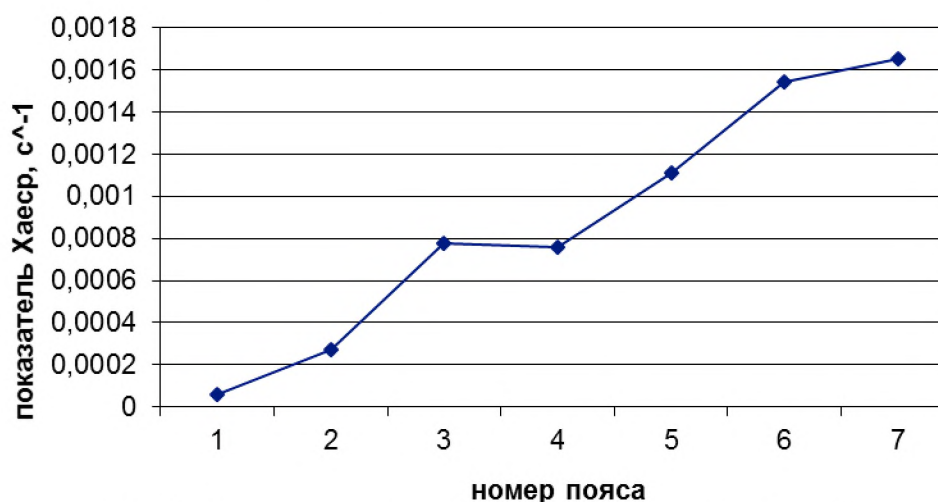


Рисунок 7 – График зависимости X_{AEcp} от номера пояса абсорбера

Таблица 4 – Корреляция основных параметров контроля с номером пояса абсорбера

Параметр, по которому определяется X_{AE}	$N_{\Sigma cp}^*$	X_{AEcp}, c^{-1}	$X_{AE макс}, c^{-1}$	Мин. коэф. запаса стат. прочности	Макс. ост. ресурс, лет	Мин. ост. ресурс, лет
Кол-во сигналов	0,896	0,984	0,925	-0,8455	-0,965	-0,965
Суммарная амплитуда сигналов	-	0,705	0,956	-0,8071	-0,959	-0,959
Количество выбросов	-	0,657	0,693	-0,5924	-0,828	-0,828

* $N_{\Sigma cp}$ - среднее количество сигналов, зарегистрированное одним каналом пояса

Самое большое количество сигналов (максимальная активность) было зарегистрировано по каналам с №№ ПАЭ 1 ($N_{\Sigma} = 2116$ сигнала), 3 ($N_{\Sigma} = 2116$), 4 ($N_{\Sigma} = 1809$), 2 ($N_{\Sigma} = 1510$), 5 ($N_{\Sigma} = 1480$), 30 ($N_{\Sigma} = 1461$), 6 ($N_{\Sigma} = 1377$)- все на поясе № 8, 20 ($N_{\Sigma} = 1241$)-пояс № 7, самой же «опасной» оказалась зона в районе ПАЭ №30 с минимальной ординатой установки (12 см, рисунок 3 а) и $X_{AE} = 0,097 c^{-1}$, что демонстрирует информативность описанных параметров X_{AE} и Y_{AE} по отношению к оценке прочности, неоднократно подтверждаемой также при анализе результатов разрушающих испытаний образцов сварных соединений различной формы с различными дефектами [9].

Дальнейший анализ результатов АЭ испытаний велся относительно источников сигналов АЭ с применением модернизированной программной АЭ локализацией и УЗК идентификацией в следующей последовательности:

1. Локализация источников АЭ;
2. Выделение участков скопления АЭ источников на различных этапах нагружения;
3. Определение временной зависимости параметров АЭ на каждом из выделенных участков и выделение временных участков однородного разрушения;
4. Обработка данных по параметрам микромеханической модели;
5. Обсуждение и сравнение полученных результатов с опытными данными, полученными при УЗК и предыдущих обследованиях;
6. Прогнозирование длительности накопления повреждений до критических значений.

Программные обеспечения АЭ систем, используемые на практике для локализации источников АЭ, могут использовать различные методы вычисления координат по выбору: по разности времен прихода или по достижению максимума сигнала, триангуляционный или ректангуляционный с возможностью подбора скорости. В целях упрощения процедуры определения координат скорость распространения акустической волны в материале обычно принимают известной, предварительно определяя акустические свойства материала объекта перед проведением контроля, либо задаваясь скоростями первой или нулевой мод волн Лэмба. Однако в действительности каждое акустико-эмиссионное событие характеризуется различными значениями скоростей волн, по меньшей мере, из-за структурной неоднородности материала объекта и наличия в нем дефектов на пути прохождения волны от источника до регистрирующего ее датчика. В связи с этим при обработке результатов контроля скорость акустической волны принималась как переменная величина, а локализация источников АЭ велась по триангуляционному методу [18], основанному на построении треугольников, связывающих выбранную систему координат, датчики антенны и источник АЭ. Используя формулы для решения треугольников и с учетом формы и характеристик антенн (величины базы и количества приемников), выводятся аналитические соотношения, которые образуют в общем случае произвольную систему уравнений.

Схема для определения координат одного из источников АЭ, вызвавшего ряд сигналов на датчиках №№31, 28,25,27, приведена на рисунке 8.

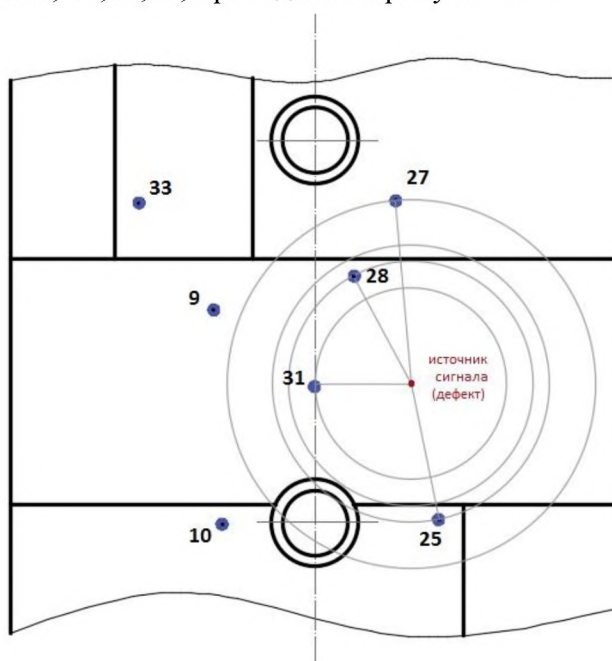


Рисунок 8 – Схема для определения координат источника АЭ
Система уравнений в этом случае имела вид

$$\begin{cases} (Y_S - Y_{31})^2 + (X_S - X_{31})^2 = vt, \\ (Y_S - Y_{28})^2 + (X_S - X_{28})^2 = v(t + PBP_{31-28}), \\ (Y_S - Y_{25})^2 + (X_S - X_{25})^2 = v(t + PBP_{31-25}), \\ (Y_S - Y_{27})^2 + (X_S - X_{27})^2 = v(t + PBP_{31-27}), \end{cases} \quad (11)$$

где X_S, Y_S – искомые координаты источника АЭ, X_{31}, Y_{31} – координаты расположения датчика №31 на развертке корпуса (для датчиков №28,25,27 аналогично) относительно начала координат, принятого в месте пересечения вертикальной оси на рисунке 5 со сварным швом, соединяющим нижний пояс и днище абсорбера, v – скорость распространения акустической волны от источника, t – время прихода первого сигнала (здесь – от зарождения волны до прихода ее на датчик №31), PBP_{31-28} – разность времен прихода сигналов на последующие датчики, отсчитываемая относительно первого сигнала.

Решение системы уравнений (11) сводилось к нахождению неизвестных X_S, Y_S, v, t . В случае, когда акустическая волна регистрируется более чем 4-мя преобразователями АЭ, появляется информационная избыточность из-за получения переопределенной системы уравнений, однако ее учет позволил получить аналитические выражения для более точного определения координат источников АЭ.

Постобработка АЭ информации решалась в программе MathCad. Для всех 4126 АЭ событий были определены координаты источников, которые затем наносились на развертку корпуса в программе AutoCad Mechanical (рисунок 9). На рисунке прослеживаются зоны скопления источников АЭ, расположенные на 7 и 8 поясах. На более высоких поясах источники сигналов рассредоточены, что с позиции изложенного подхода свидетельствует о протекании на этих участках нелокализованного разрушения, не представляющего опасности для работоспособности конструкции.

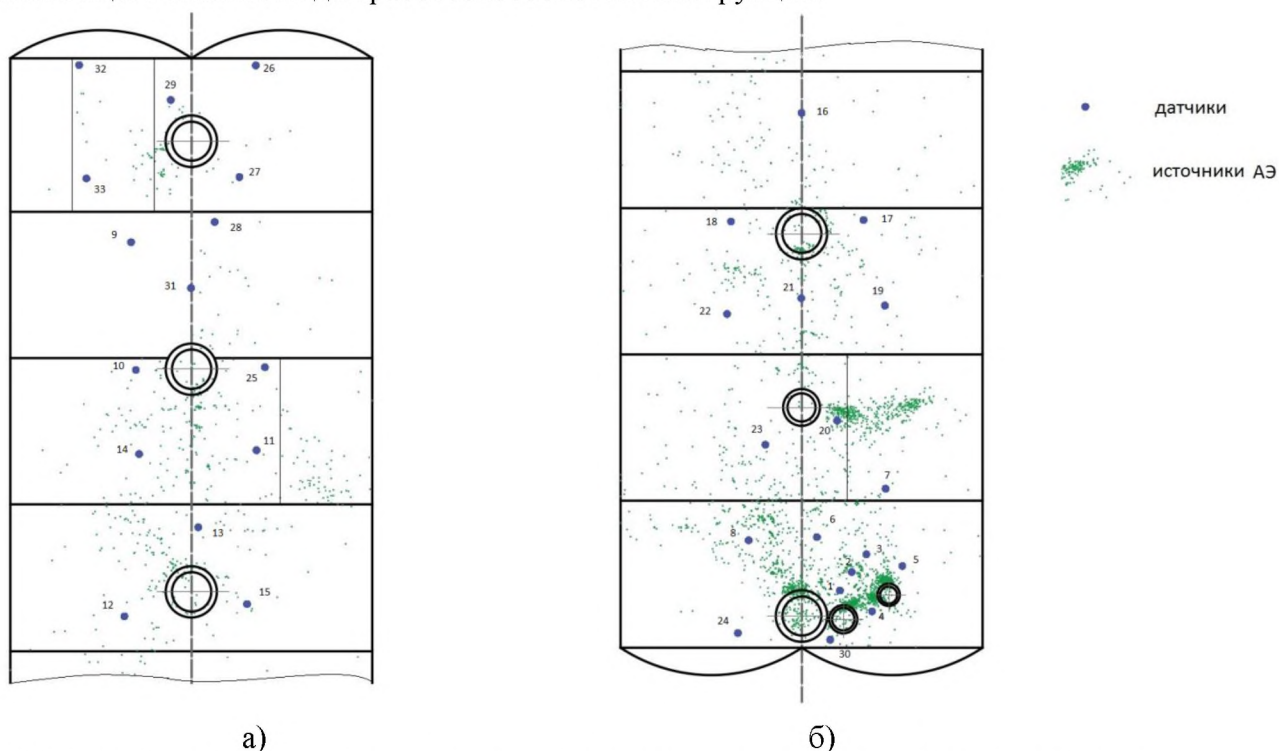


Рисунок 9 – Локация источников АЭ на развертке корпуса абсорбера: а) 1-4 пояса; б) 5-8 пояса.

Определение значений Y_{AE} велось для отдельных зон с известными характеристиками дефектов. С этой целью были совмещены картина локации и схема проведения УЗК и рассматривались части кластеров АЭ событий на участках №№1-7 (рисунок 10).

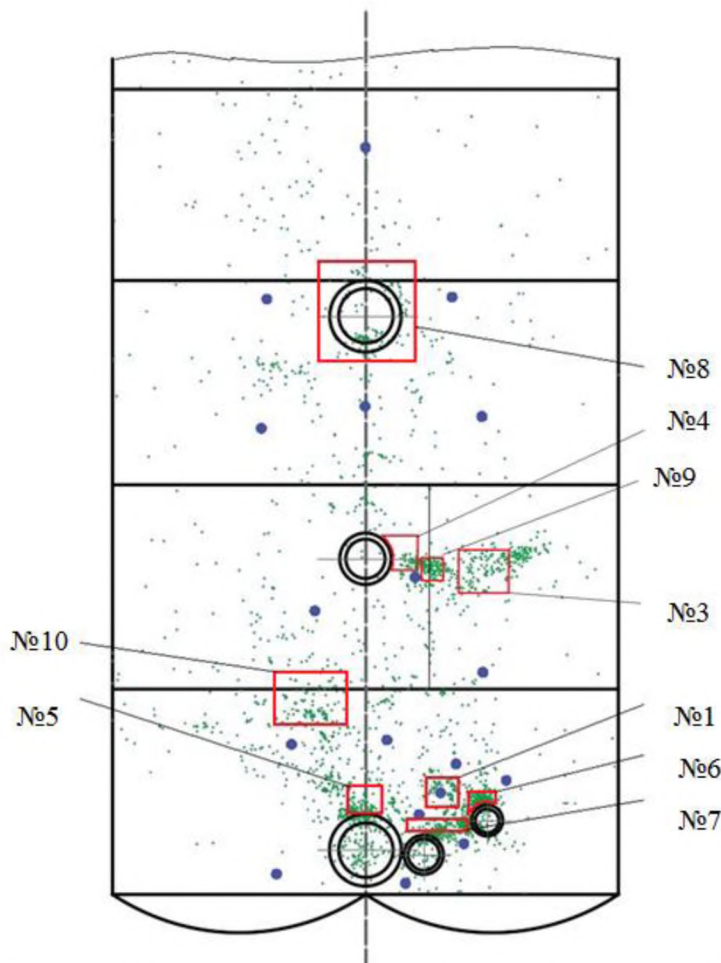


Рисунок 10 – Участки АЭ-активности в зонах №№1-7 контроля УЗ и участках дополнительного анализа №№ 8,9.

Для наиболее АЭ активной во всему абсорберу зоны в районе 20-го канала были построены в графики зависимостей логарифма числа зарегистрированных в течение испытаний импульсов N_{Σ} от напряжений $\ln N_{\Sigma}(\sigma)$ в стенке сосуда (с учетом того, что скорость роста давления в течение испытаний менялась). На участках №№3,4 этап однородного разрушения наблюдался с 5-й по 11-ю минуты испытаний (рисунок 11). Из уравнения (5) следует, что тангенс угла наклона Y_{AE} прямой на данном участке и является показателем прочностного состояния $\gamma/(KT)$.

На участке 4

$$Y_{AE} = d\ln N_{\Sigma}/d\sigma = 0,0115 \text{ МПа}^{-1}$$

Аналогично на участке 3

$$Y_{AE} = d\ln N_{\Sigma}/d\sigma = 0,0135 \text{ МПа}^{-1}$$

На участках №№1,5,6,7, выделенных также по признаку высокой активности АЭ для контроля методом УЗ на нижнем поясе, аналогичный анализ показал, что этап однородного разрушения в этих зонах протекает с 8-й по 11-ю минуты испытаний. При этом для участка №1 $Y_{AE}=0,0730 \text{ МПа}^{-1}$, для №5 $Y_{AE}=0,0701 \text{ МПа}^{-1}$, для №6 $Y_{AE}=0,0772 \text{ МПа}^{-1}$, для №7 $Y_{AE}=0,0716 \text{ МПа}^{-1}$.

$\ln N$

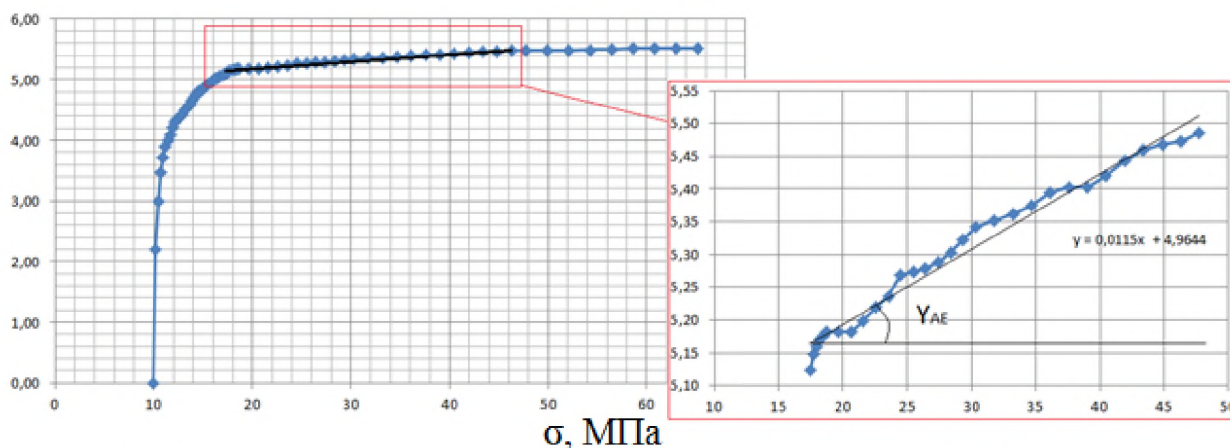


Рисунок 11– Зависимость $\ln N_{\Sigma}(\sigma)$ на участке №4, определение параметра Y_{AE} .

Совпадение временных диапазонов протекания этапа однородного разрушения (5-11 минуты для участков №№3,4 и 8-11 минуты – для участков №№1,5,6,7) и близкие значения показателя прочностного состояния Y_{AE} ($0,0115 \text{ МПа}^{-1}$ и $0,0135 \text{ МПа}^{-1}$ для 7 пояса и $0,0701-0,0772 \text{ МПа}^{-1}$ для 8 пояса) являются признаками примерно равной степени деградации структуры в пределах одного пояса, при этом бóльшие значения параметра Y_{AE} 8-го пояса свидетельствуют о его более неблагоприятном прочностном состоянии. Если для участков №3 и №4 это подтверждается результатами УЗК, выявившим нерегулярную несплошность на обоих участках, то для нижнего пояса полноценный контроль методом УЗК проводился лишь для наиболее АЭ активного участка №1 (автоматический УЗД и УЗД на фазированной решетке, выявившие на участке №1 наличие двух расслоений на разных глубинах и разных стадий развития), для остальных же участков контроль проводился только автоматическим УЗД, наиболее опасная же с нашей точки зрения зона с максимальными значениями параметров X_{AE} и Y_{AE} была выявлена в районе ПАЭ №30 (по активности АЭ канал этого ПАЭ был на шестом месте, табл. 3), которая УЗК обследованием была пропущена. Локализация показала расположение источника в сварном шве приварки нижнего патрубка (между 30-м и 24-м ПАЭ, рис. 3), где, как показала практика, чаще всего и располагаются наиболее опасные дефекты [1]. Это обстоятельство говорит о том, что повышение активности АЭ при наводораживании материала происходит из-за роста акустически активного объема контролируемой зоны, не однозначно связанной с ресурсом, а повышенная АЭ активность не является достаточным признаком опасности дефекта.

Кроме того, рассматривались и другие локационные кластеры АЭ событий, визуально наблюдаемые на развертке корпуса абсорбера с нанесенной локационной картиной источников АЭ. На рисунке 10 показаны три дополнительно проанализированных участка. Кластер №8, как видно из рисунка, располагается вокруг люка-лаза. Предположительно, сигналы акустической эмиссии на рассматриваемом участке инициировались так же расслоениями, т.к. люк-лаз располагается вблизи массообменного устройства, где, как правило, процессы развития расслоений протекают активнее, чем на участках, более удаленных. Анализ временной зависимости сигналов по вышеизложенной методике свидетельствует о прочностном состоянии участка №8, аналогичном участкам №№3,4: этап однородного разрушения протекал с 8-й по 12-ю минуты испытаний, параметр $Y_{AE}=0,0113 \text{ МПа}^{-1}$. Участок №9, выбранный на 7 поясе, характеризуется значением $Y_{AE}=0,014 \text{ МПа}^{-1}$, что указывает на прочностное состояние, близкое к состоянию соседних участков №3 и №4. На участке №10, выделенном на корпусе аппарата, параметр Y_{AE} , определенный в промежутке с 8-й по 11-ю минуты, равен $0,0091 \text{ МПа}^{-1}$. В сравнении со всеми рассмотренными кластерами, участок №10 характеризуется наиболее благоприятным прочностным состоянием, однако близкое к критическому значение $Y_R=0,011 \text{ МПа}^{-1}$ для бездефектного металла, свидетельствует о наличии развивающегося дефекта в свар-

ном шве или близ него. При этом вид дефекта может отличаться от расслоений и может представлять собой трещину или дефект шва технологического характера. Как показали многочисленные примеры анализа АЭ поведения дефектов в сварных швах, временные зависимости накопления повреждений в них имеют одинаковый характер, и степень опасности таких дефектов может быть оценена по параметрам микромеханической модели [19].

Результаты расчета по формулам (7), (8), (10) числа N циклов до разрушения в области исследуемых источников для диагностируемого абсорбера приведены в таблице 5. Наименьшее значение остаточного ресурса из рассмотренных имеет участок №9, т.к. для его расчета предел выносливости принимался как для сварного соединения.

Таблица 5 – Результаты расчета ресурса участков корпуса абсорбера

№ участка	№ пояса	Параметр Y_{AE}	Число циклов до разрушения N
1	8	0,0730	$87,4 \cdot 10^6$
3	7	0,0135	$92,7 \cdot 10^6$
4	7	0,0115	$92,9 \cdot 10^6$
5	8	0,0701	$87,6 \cdot 10^6$
6	8	0,0772	$87,0 \cdot 10^6$
7	8	0,0716	$87,5 \cdot 10^6$
8	6	0,0113	$92,9 \cdot 10^6$
9	7	0,0140	$64,5 \cdot 10^6$
10	7,8	0,0091	$93,1 \cdot 10^6$

Описанные примеры демонстрирует перспективность применения предлагаемого подхода для детального анализа первичной АЭ информации, поступающей от объекта контроля.

Вывод

Описан подход к неразрушающей оценке прочностного состояния сосудов, работающим под давлением в водородосодержащих средах по параметрам акустической эмиссии, опирающийся на микромеханическую модель временных зависимостей параметров АЭ, объединяющий макро-, микро-, и нано-уровни решения задач прочностной надёжности, изложена последовательность оценки прочностного состояния сосудов, работающих под давлением в водородосодержащих средах. Подход дает возможность оперативной экспресс-оценки ресурса объекта контроля и исключает необходимость проведения обучающего эксперимента посредством разрушающих АЭ испытаниях эталонных образцов. Апробация подхода показала его универсальность на примере эффективного применения для объектов с дефектами как усталостного, так химического происхождения в условиях наводораживания. Показано, что повышение активности АЭ при наводораживании материала не является достаточным признаком опасности дефекта, поскольку происходит, главным образом, из-за роста акустически активного объёма контролируемой зоны, не однозначно связанного с ресурсом. Результаты исследований могут быть распространены на методику продления срока безопасной эксплуатации магистральных газопроводов при расчете их долговечности, которые в настоящее время проводят из расчета на выносливость.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гомера В.П., Растегаев И.А. К вопросу о раннем диагностировании расслоений в стенках сосудов давления ультразвуковым и акустико-эмиссионным метода-

ми//Контроль. Диагностика, 2015. – с.82-90.

2. Черняк Я.С., Дуров В.С. Ремонтные работы на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях.– Москва: Химия, 1975.- 264 с.

3. Лидер, А.М. Метод ультразвукового определения водорода в материалах и изделиях на основе титана / А.М. Лидер, В.В. Ларионов, Г.В. Гаранин, Х.В. Кренинг // Журнал технической физики. – 2013 – Т. 83. – Вып. 9. – С. 157–158.

4. Лидер, А.М. Позитронная спектроскопия дефектов в субмикроструктурном никеле после низкотемпературного отжига / П.В. Кузнецов, Ю.П. Миронов, А.И. Толмачев, Ю.С. Бордулев, Р.С. Лаптев, А.М. Лидер, А.В. Корзников // Физика твердого тела. – 2015 – Т. 57. – Вып. 2. – С. 209–218.

5. Ткачев, В.И. Сравнительная оценка водородостойкости сталей и сплавов / В.И. Ткачев, В.И. Витвицкий, В.И. Холодный // Материаловедение. – 2006. –Т. 1. – С. 54–56.

6. Локошенко, А.М. Экспериментально-теоретическое исследование влияния водорода на ползучесть и длительную прочность титанового сплава ВТ6 / А.М. Локошенко, А.А. Ильин, А.М. Мамонов, В.В. Назаров // Металлы. – 2008. – №. 2. – С. 60–66.

7. Назаров, В.В. Влияние водорода на ползучесть и разрушение титановых сплавов / В.В. Назаров // Заводская лаборатория. – 2012. – Т. 78, № 12. – С. 59–65.

8. Ларионов, В.В. Вихретоковый метод исследования наводороженных легких сплавов на основе титана / В.В. Ларионов, Д.В. Румбешта // Вестник ТГПУ, серия: естественнонаучное образование. – 2012. – Т. 6, № 127. – С. 76–79.

9. Буйло, С.И. Акустико-эмиссионная диагностика влияния водорода на свойства материалов / С.И. Буйло // Дефектоскопия. – 2009. – №. 11. – С. 94–98.

10. Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики : монография / С. И. Буйло ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2017. – 184 с.

11. РД 26.260.004-91 Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации <http://files.stroyinf.ru/Index2/1/4294847/4294847460.htm>

12. Носов В.В. Принципы оптимизации технологий акустико-эмиссионного контроля прочности промышленных объектов// Дефектоскопия, № 7, 2016, с. 52-67

13. Nosov V. V. On the Principles of Optimizing the Technologies of Acoustic-Emission Strength Control of Industrial Objects// Russian Journal of Nondestructive Testing, 2016, 2016, Vol. 52, No. 7, pp. 386–399.)

14. Петров В.А., Башкарев А.Я., Веттегрень В.И. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. – СПб.: Политехника, 1993. –475 с.

15. Стандарт организации. Методика продления срока безопасной эксплуатации магистральных газопроводов ОАО «ГАЗПРОМ» СТО ГАЗПРОМ 2-3.5-252-2008. <http://www.nchkz.ru/lib/59/59474/index.htm>

16. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования. Учебное пособие. — Изд-во «Лань», СПб, 2012, 2-е изд. перераб. и доп. — 384 с.

17. Махутов Н.А., Воробьев А.З., Гаденин М.М. и др. Прочность конструкций при малоцикловом нагружении. – М.:Наука, 1983. – 271 с.

18. Наконечная О.А. Методы и алгоритмы локализации источников акустической эмиссии// Электромашиностроение и электрооборудование. 2009. № 73. С. 11-115.

19. Носов В.В., Самигуллин Г.Х., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А. Микромеханическая модель акустической эмиссии как методическая основа прогнозирования разрушения сварных соединений//Нефтегазовое дело. 2016. - Т.14, №1. – 244-253 с.