

ПМК-УРАЛ

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ООО «ПМК-Урал»



А.А. Зобнина

05

2026 г.

ПРОГРАММА

повышения квалификации по акустико-эмиссионному методу
неразрушающего контроля

(подготовка к аттестации по СДАНК-02-2020, I и II уровни)

г. Пермь, 2026

1. ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа рассчитана на подготовку специалистов к аттестации на II уровень по акустико-эмиссионному (АЭ) методу. Охватывает физические основы генерации волн напряжения, аппаратуру для регистрации, технологию контроля и методы оценки источников АЭ. Подготовка ведётся согласно СДАНК-02-2020.

2. ЦЕЛЬ

Сформировать у слушателей умения планировать АЭ-контроль, устанавливать преобразователи, настраивать систему, проводить испытания и выполнять классификацию источников с выдачей заключения.

3. ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН (91 час: 35 + 56)

№	Тема	Часы
1	Введение в АЭ-метод и материаловедение	8
2	Физические основы акустической эмиссии	10
3	Аппаратура и преобразователи АЭ	11
4	Методы обработки сигналов АЭ	11
5	Технология АЭ-контроля объектов	12
6	Оценка результатов и критерии приёмки	8
7	Нормативная база и метрологическое обеспечение	6
8	Настройка аппаратуры и калибровка	6
9	Проведение АЭ-контроля на образцах	9
10	Разработка методики и заключения	6
11	Предэкзаменационная подготовка и тестирование	4
Всего		91

4. СОДЕРЖАНИЕ ТЕМ

Тема 1. Введение в АЭ-метод и материаловедение (8 ч)

1.1. Принцип акустико-эмиссионного контроля

Отличие АЭ от активных методов НК: регистрация собственной энергии материала, высвобождаемой при развитии дефектов. АЭ – пассивный метод, не требующий

зондирующего излучения. История развития, современное состояние. Преимущества: обнаружение развивающихся дефектов, возможность контроля всего объекта за одно нагружение, высокая чувствительность к динамическим процессам. Ограничения: сложность интерпретации, необходимость нагружения объекта, влияние уровня шумов.

1.2. Источники акустической эмиссии в конструкционных материалах

Механизмы генерации упругих волн:

- *Пластическая деформация:* движение дислокаций, образование полос скольжения.
- *Зарождение и рост трещин:* микро- и макро-трещины, вязкое и хрупкое разрушение.
- *Фазовые превращения:* мартенситное, образование интерметаллидов.
- *Трение:* контактирующих поверхностей (берегов трещин, крепёжных соединений).
- *Коррозионные процессы:* водородное охрупчивание, коррозионное растрескивание.
- *В композитах:* разрушение волокон, растрескивание матрицы, расслоение.

Типичные примеры: АЭ при гидроиспытаниях сварных сосудов, рост усталостной трещины в валах, разрушение клеевых соединений.

1.3. Влияние свойств материала на АЭ

Зависимость параметров АЭ от структуры (размер зерна, фазовый состав), предела текучести, вязкости разрушения. Материалы с высоким затуханием ультразвука (аустенитные стали, чугун) быстро ослабляют сигналы. Анизотропия композитов.

1.4. Система аттестации персонала по АЭ

Требования СДАНК-02-2020 к специалистам I, II и III уровней. Ответственность персонала II уровня за планирование испытаний, расстановку датчиков, оценку результатов. Требования безопасности: работа под нагрузкой, высотные работы, электробезопасность.

Тема 2. Физические основы акустической эмиссии (10 ч)

2.1. Распространение упругих волн от точечного источника

Типы генерируемых волн: продольные (сL), поперечные (сТ), поверхностные (Рэлея). В пластинах – волны Лэмба (симметричные и антисимметричные моды). Затухание амплитуды с расстоянием: геометрическое рассеяние (для объёмных волн $\sim 1/r$, для поверхностных $\sim 1/\sqrt{r}$) и поглощение в материале (α , дБ/м). Влияние частоты на дальность обнаружения.

2.2. Временные характеристики сигналов АЭ

Форма импульса: крутой передний фронт, экспоненциальный спад. Длительность, время нарастания, амплитуда. Влияние резонанса датчика. Параметры классического сигнала (по ГОСТ 27655): число выбросов (counts), суммарный счёт, частота следования, энергия (площадь под огибающей). Использование RMS (среднеквадратичного напряжения) для непрерывной эмиссии.

2.3. Эффект Кайзера и эффект Фелисити

Эффект Кайзера: отсутствие АЭ при повторном нагружении до уровня предыдущей максимальной нагрузки (при условии отсутствия развития дефектов). Физическая природа – необратимость пластических деформаций. Применение для оценки

напряжённого состояния. Эффект Фелисити: появление АЭ при нагрузке ниже предыдущей максимальной – свидетельствует о наличии структурных изменений (например, рост трещины). Коэффициент Фелисити (отношение нагрузки начала АЭ к предыдущей max). Использование в критериях оценки композитных конструкций.

2.4. Параметрический анализ

Зависимость активности АЭ от внешних параметров: нагрузка, давление, температура, деформация. Построение графиков: суммарный счёт – время/нагрузка, скорость счёта – время. Корреляция с механическими событиями (текучесть, разрушение). Определение критической нагрузки.

Тема 3. Аппаратура и преобразователи АЭ (11 ч)

3.1. Датчики АЭ

Пьезоэлектрические преобразователи: резонансные (с узкой полосой, высокая чувствительность) и широкополосные. Типичные резонансные частоты: 30 кГц, 60 кГц, 150 кГц, 300 кГц. Чувствительность (дБ относительно 1 В/(м/с)). Защищённые конструкции для промышленных условий. Способы крепления: магнитные держатели, клеевые соединения, струбцины. Применение контактных сред (консистентная смазка, эпоксидная смола) для улучшения акустической связи. Влияние качества установки на регистрируемый сигнал.

3.2. Предусилители и кабели

Предусилитель: усиление (обычно 40 дБ), входной импеданс, фильтры (верхних и нижних частот). Расположение как можно ближе к датчику. Коаксиальные кабели, требования к помехозащищённости. Разъёмы (BNC, LEMO).

3.3. Многоканальные системы АЭ

Структура современной системы: входные модули с АЦП (разрешение 16-18 бит), частота дискретизации (не менее 1 МГц), параллельная обработка. Функции: задание порогов по каналам, измерение параметров в реальном времени, локация источников, визуализация. Программное обеспечение: сбор, анализ, архивирование, построение карт локации. Количество каналов от 4 до сотен.

3.4. Калибровочные источники

Карандашный грифель (источник Хсу-Нильсена, ASTM E1106): воспроизводимый сигнал, моделирующий микротрещину. Пьезоэлектрический имитатор (пульсер) – генерирует повторяемые импульсы. Использование для проверки чувствительности датчиков и измерения скорости.

Тема 4. Методы обработки сигналов АЭ (11 ч)

4.1. Выделение сигналов на фоне шумов

Пороговая обработка: плавающий порог (следит за уровнем шума), фиксированный порог. Временные параметры: время блокировки после превышения порога (HDT – hit definition time), время блокировки повторных срабатываний (HLT – hit lockout time). Фильтрация по частоте и амплитуде.

4.2. Измеряемые параметры

Для каждого «удара» (hit) вычисляются: амплитуда (максимальное напряжение, дБ),

длительность, время нарастания, число выбросов (counts), энергия (интеграл квадрата сигнала), пиковая частота. Статистические распределения параметров для классификации источников.

4.3. Локация источников

Измерение разностей времени прихода (Δt) на разные датчики. Необходимость знания скорости звука (измеряется с помощью искусственного источника). Линейная локация (вдоль линии – трубы, сваи): используется два датчика и Δt для определения положения между ними. Планарная локация (на плоскости): минимум три датчика, решается система уравнений. Погрешность локации (обычно несколько процентов от расстояния между датчиками). Методы повышения точности: выбор алгоритма (невязка по методу наименьших квадратов).

4.4. Классификация источников

Использование диаграмм (например, амплитуда – длительность, энергия – число выбросов). Разделение на механические шумы (трение, ослабление болтов) и дефектные источники (рост трещины). Применение нейросетей и машинного обучения в современных системах.

Тема 5. Технология АЭ-контроля объектов (12 ч)

5.1. Планирование испытаний

Определение цели контроля (обнаружение развивающихся дефектов, утечек). Выбор схемы расстановки датчиков с учётом затухания: расстояние между датчиками должно обеспечивать регистрацию источника с пороговой амплитудой хотя бы на минимальном количестве каналов (обычно три для планарной локации). Измерение затухания и скорости на объекте. Разметка координатной сетки.

5.2. Программа нагружения

Согласование с проектной документацией. Этапы: ступенчатое увеличение нагрузки с выдержками для регистрации АЭ, максимальная нагрузка, разгрузка. Скорость нагружения. Для сосудов давления – гидро- или пневмоиспытания. Для мостов – тестовая нагрузка транспортными средствами.

5.3. Проведение контроля и сбор данных

Проверка работоспособности каналов по калибровочным источникам. Запись АЭ в реальном времени. Ведение журнала испытаний: соответствие нагрузки и меток времени. Анализ активности во время испытаний – при резком росте активности возможно досрочное прекращение.

5.4. Особенности контроля различных объектов

- *Сосуды давления:* контроль сварных швов, зон концентраторов.
- *Трубопроводы:* локация утечек (непрерывная эмиссия), контроль коррозии.
- *Мостовые конструкции:* выявление усталостных трещин.
- *Композиционные конструкции:* выявление расслоений, разрушения волокон.

5.5. Комплексование с другими методами НК

АЭ указывает зоны активности, которые затем детально обследуются ультразвуковым,

радиографическим или визуальным методом для определения точного размера и типа дефекта.

Тема 6. Оценка результатов и критерии приёмки (8 ч)

6.1. Классификация источников по ГОСТ Р 55044

Категории источников:

- *I (пассивный)*: нет значимой активности, единичные сигналы.
- *II (активный)*: устойчивая активность, рост суммарного счёта при постоянной нагрузке, отсутствие локации.
- *III (критически активный)*: локализованные источники с нарастающей активностью, появление при нагрузке ниже рабочей.
- *IV (катастрофически активный)*: лавинообразный рост АЭ, немедленная остановка испытаний.

Использование дополнительных критериев: критерий монотонности (постоянный рост с ростом нагрузки), критерий устойчивости (продолжение АЭ при выдержке нагрузки).

6.2. Оценка степени опасности и приёмки

Для сосудов: допускаются источники только I класса; II и III класс требуют проведения дополнительного НК и, при необходимости, ремонта. Документирование результатов: протокол АЭ-контроля, карты локации, графики активности, заключение о годности.

Тема 7. Нормативная база и метрологическое обеспечение (6 ч)

7.1. Основные нормативные документы

ГОСТ Р 55044-2012 «Контроль неразрушающий. Акустико-эмиссионный метод. Общие требования». ГОСТ 27655-88 «Акустическая эмиссия. Термины и определения».

Международные стандарты: ISO 12713, ISO 12714, ASTM E569, ASTM E650. Отраслевые РД (РД-03-131-97, СТО Газпром).

7.2. Метрологическое обеспечение АЭ-аппаратуры

Проверка АЭ-системы с помощью эталонных источников (имитаторы АЭ). Основные проверяемые параметры: пороговая чувствительность канала, динамический диапазон, погрешность измерения Δt , погрешность локации. Периодичность поверки – не реже одного раза в год. Требования к протоколам поверки.

Тема 8. Настройка аппаратуры и калибровка (6 ч)

Цель: освоить подготовку многоканальной АЭ-системы, установку датчиков, измерение скорости звука и затухания, проверку локационной способности.

Оборудование: многоканальная АЭ-система (4–8 каналов), резонансные датчики 150 кГц, предусилители (40 дБ), магнитные держатели, контактная смазка, карандашный грифель (твёрдость 2Н), линейка, металлическая пластина или отрезок трубы, генератор сигналов для проверки электронного тракта.

Порядок:

1. **Сборка и проверка каналов:** подключить датчики через предусилители, задать пороги чувствительности (например, 45 дБ), настройки HDT и HLT, частотные фильтры (100-300 кГц). Проверить уровень шума.
2. **Установка датчиков:** закрепить датчики на объекте с помощью магнитных держателей, используя смазку для акустического контакта. Измерить координаты.
3. **Измерение скорости звука:** искусственными источниками (карандашным грифелем) выполнить серию щелчков в различных точках, зафиксировать разности времён прихода, вычислить скорость продольной волны (для стали ~5900 м/с).
4. **Измерение затухания:** в одной точке на разных расстояниях от датчика произвести одинаковые щелчки, записать амплитуды, построить кривую затухания. Определить максимальное расстояние регистрации сигнала с заданным минимальным запасом над порогом.
5. **Проверка локации:** на известных координатах (отмечены маркером) выполнить щелчки, наблюдать вычисленные координаты на экране. Оценить погрешность.
6. **Документирование:** сохранить настройки, записать протокол калибровки.

Тема 9. Проведение АЭ-контроля на образцах (9 ч)

Цель: выполнить АЭ-контроль при механическом нагружении лабораторного образца с дефектом, освоить сбор и первичный анализ данных.

Оборудование: АЭ-система с 4 датчиками, испытательная машина (гидравлический пресс), образец – стальная пластина с концентратором (отверстие, надрез) или малый сосуд, тензодатчик или датчик перемещения, калибровочные источники.

Порядок:

1. **Подготовка образца и нагружающей системы:** механически очистить поверхность, установить датчики вблизи зоны ожидаемого разрушения, но вне зоны пластической деформации. Подключить параметрический канал (нагрузка).
2. **Калибровка и проверка на нулевой нагрузке:** провести имитацию, убедиться в работоспособности всех каналов.
3. **Проведение нагружения:** ступенчато увеличивать нагрузку (например, 0 → 20 кН → 40 кН → 60 кН → 80 кН, с выдержками 1-2 минуты), регистрировать АЭ.
4. **Наблюдение за процессом:** по графику активность – нагрузка. Отметить нагрузку начала пластической деформации (появление первых значимых сигналов), нагрузку Фелисити (если разгрузим и снова нагрузим). На стадии развития трещины наблюдать резкий рост активности.
5. **Локация источников:** после испытания построить карты локации, сопоставить с положением концентратора и реальной зоны разрушения.
6. **Первичная классификация:** выделить шумы (от захватов) и сигналы от образца, используя амплитудные и временные критерии.
7. **Оформление отчёта:** составить протокол испытаний с графиками, картами, выводами.

Тема 10. Разработка методики и заключения (6 ч)

Цель: научиться разрабатывать рабочую методику АЭ-контроля для реального объекта и оформлять заключение.

Задание: каждый слушатель получает техническое описание объекта (например, горизонтальный резервуар для хранения нефтепродуктов, участок магистрального трубопровода, мостовая балка) и нормативный документ с критериями приёмки. Он должен разработать методику, включающую:

- цель и объём контроля,
- схему расстановки датчиков (с обоснованием расстояний),
- требования к подготовке поверхности и монтажу датчиков,
- программу нагружения (гидроиспытания, статическая нагрузка),
- параметры настройки аппаратуры (пороги, фильтры, НДТ...),
- критерии классификации источников и приёмки,
- требования к отчётности.

Ролевая игра: другой слушатель выполняет «контроль» по этой методике на учебном образце или на основе предоставленных данных (реальных АЭ-записей). Автор методики затем проверяет правильность оформления результатов, оценивает корректность классификации и пишет итоговое заключение о годности объекта.

Обсуждение: анализ ошибок в методиках, корректировка, обсуждение влияния неучтённых факторов.

Тема 11. Предэкзаменационная подготовка и тестирование (4 ч)

Цель: систематизировать знания по АЭ-методу и подготовиться к квалификационным экзаменам.

Содержание:

- Повторение теории: механизмы АЭ, эффекты Кайзера/Фелисити, локация, классификация источников.
- Решение тестовых вопросов из сборника Независимого органа (не менее 30 вопросов).
- Решение практических задач: по предоставленным графикам активности определить наличие критических источников, по данным локации оценить дефектную зону.
- Пробное практическое задание: на лабораторной установке за ограниченное время настроить аппаратуру, выполнить контроль образца и оформить заключение.
- Индивидуальные консультации по ошибкам, выдача допуска к экзамену.

5. НОРМАТИВНАЯ БАЗА

- ГОСТ Р 55044. Контроль неразрушающий. Акустико-эмиссионный метод. Общие требования.
- ГОСТ 27655. Контроль неразрушающий. Термины и определения в области акустической эмиссии.
- РД 03-131-97 и другие отраслевые документы.