



МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

А.В. Петров[†], О.В. Просеков

[†]Санкт-Петербургский государственный университет
aleksndr19@rambler.ru

Определения

Акустика (от греч. ἀκούω (акуо) — слышу) —

- в узком смысле слова — учение о звуке, то есть о волнах плотности в газах, жидкостях и в твёрдых телах, слышимых человеческим ухом (диапазон от 16 Гц до 20 кГц).
- в широком смысле слова — область физики, изучающая свойства упругих колебаний и волн от низких частот (условно от 0 Гц) до предельно высоких частот $10^{12} - 10^{13}$ Гц, их взаимодействия с веществом и применение полученных знаний для решения широкого круга инженерных проблем.

Определения

- **Эмиссия** (от греч. ἔκπεμψις — испускание телом упругих или электромагнитных волн в окружающую среду.
- **Акустическая эмиссия** — процесс образования и распространения упругих волн, возникающих при высвобождении энергии в материале вследствие его изменения или разрушения.

ГОСТ Р ИСО 12716–2009. Контроль неразрушающий. Акустическая эмиссия.
Словарь терминов.

История

Термин **акустическая эмиссия** был впервые введён и научно обоснован немецким инженером и учёным Йозефом Кайзером (Josef Kaiser) в 1950 году в его докторской диссертации, защищённой в Техническом университете Мюнхена.

В своей работе Кайзер провёл систематическое исследование звуковых сигналов, возникающих в металлических материалах при их растяжении.

Он выявил, что при механической нагрузке материалы испускают упругие волны, связанные с микроструктурными изменениями.

Физические основы

- Явление акустической эмиссии (АЭ) - это реакция твердого тела на приложенную нагрузку: выделение избыточной энергии в виде упругих волн при разрушении элементов нагруженного тела.
- АЭ существует только при приложении нагрузки.
- Пример АЭ в реальной жизни - треск, когда ломается деревянная палка, лед и т.д. Этот тип АЭ можно услышать на слух без использования специального оборудования.

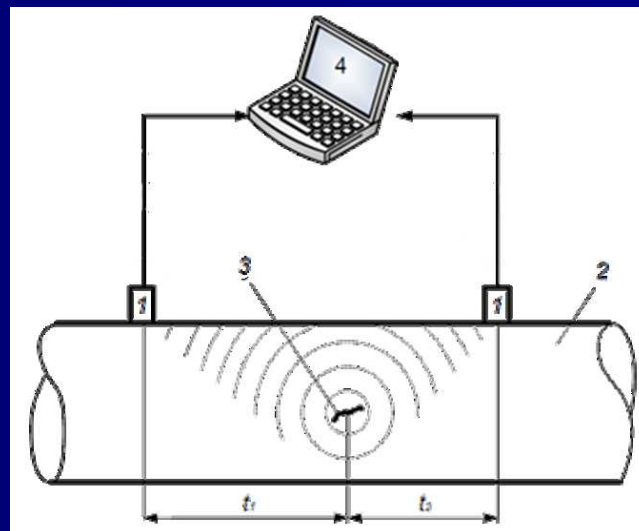
АЭ тестирование как метод неразрушающего контроля

- Основан на регистрации и анализе упругих волн, возникающих при развитии дефектов, трении, утечке жидкости или газа через сквозные дефекты.
- Выявляет развивающиеся под нагрузкой, то есть наиболее опасные дефекты.
- Не требует сканирования поверхности объекта для поиска локальных дефектов.
- Необходимо только правильное размещение датчиков на поверхности объекта для определения местоположения источника АЭ.

Схема АЭ тестирования

- Упругие волны распространяются от источника к датчикам, где они преобразуются в электрические сигналы.
- Оборудование АЭ регистрирует эти сигналы и выводит данные на экран в виде осциллограмм, местоположений, цифровых индикаций, на основании которых оператор может оценить состояние и поведение структуры материала под напряжением, обнаружить и локализовать дефекты.

Схема АЭ тестирования



1. Датчики АЭ.
2. Технологический трубопровод под нагрузкой.
3. Источник АЭ (трещина, утечка и т.д.).
4. Оборудование АЭ (система, ноутбук и т.д.).

Схема АЭ тестирования



Схема АЭ тестирования



Регистрация формы АЭ сигнала

Тип АЭ аппаратуры определяется возможностью регистрации формы АЭ сигнала.

- **Параметрическая форма сигнала АЭ** — это регистрация и описание сигнала в виде совокупности его параметров, измеренных при пересечении сигналом заданного **порогового уровня**.
- **Волновая форма (осциллограмма) сигнала АЭ.**

ГОСТ 27655–88 "Акустическая эмиссия. Термины и определения".

Регистрация формы АЭ сигнала

Основные параметры, характеризующие АЭ сигнал:

Параметр	Обозначение	Описание
Время регистрации	T_0	Время прихода сигнала
Амплитуда	A	Пиковое значение сигнала
Длительность	D	Время от начала до конца сигнала
Время подъёма	RT (Rise Time)	Время от начала до пика сигнала
Количество превышений порога	C (Counts)	Сколько раз сигнал пересёк порог
Энергия	E	Интеграл по квадрату сигнала

Регистрация формы АЭ сигнала

Сравнение форм АЭ сигналов:

Характеристика	Параметрическая форма	Осциллограмма (waveform)
Хранит всю форму сигнала	Нет	Да
Требует много памяти	Нет	Да
Позволяет повторный анализ	Ограниченно	Полный спектральный анализ
Применяется для фильтрации	Да (по параметрам)	Только при дополнительной обработке

В основном регистрация параметрической формы АЭ сигнала применялась в АЭ системах ранних поколений, построенных на сигнальных процессорах низкой производительности, например, ADSP2101.

Современные АЭ системы поддерживают регистрацию волновой формы АЭ сигнала.

Определение координат источников АЭ

Знание координат источников АЭ имеет большое практическое значение, поскольку источниками являются дефекты структуры материала.

Полагают, что понятие координаты «источника АЭ» и «дефекта» эквивалентны.

Дефекты могут иметь пространственную конфигурацию и характеризоваться геометрическим местом точек.

Определение координат дефектов с помощью АЭ первоначально было основано на принципах пассивной радиолокации (звуколокации).

В. А. Грешников, Ю. Б. Дробот. Акустическая эмиссия: применение для испытаний материалов и изделий. Москва, Изд-во стандартов, 1976

Определение координат источников АЭ

Рассмотрим простейшую задачу локации источника АЭ датчиками, расположенными на плоскости, на основе линейной изотропной модели распространения упругих волн в материале **с постоянной скоростью c** .

Будем считать, что первым зарегистрировавшим сигнал был датчик с номером 1.

Примем следующие обозначения:

(x_i, y_i) - координаты i -го датчика.

t_i - время прихода сигнала на i -й датчик.

$\Delta t_i = t_i - t_1$ - разность времен прихода (РВП) сигнала.

$i = 1..n$ - номер датчика.

Определение координат источников АЭ

Необходимо найти координаты (x, y) источника АЭ.

Выполнены следующие равенства:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = c^2 \cdot (t + \Delta t_i)^2, i = 1..n, \quad (1)$$

где t - время распространения сигнала от источника АЭ до 1-го зарегистрировавшего его датчика.

Система равенств (1) решается методом линеаризации относительно (x, y, t) , то есть вычитанием уравнения при $i = 1$ из остальных.

Система равенств (1) может не иметь, или иметь не единственное решение при $n = 3$.

Определение координат источников АЭ

Недостатки:

- Должны быть зарегистрированы одинаковые типы волн (с одинаковой скоростью). **Регистрируются разные типы волн, что приводит к ошибке.**
- Точность определения координат источника АЭ достигается только внутри треугольника, образованного датчиками ($n = 3$).
- Зависимость координат источника АЭ от погрешности определения t_i . **Сигналы содержат шумы и помехи.**

Определение координат источников АЭ

Заметим, что в системе равенств (1) можно учитывать разные скорости распространения волн.

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = c_j^2 \cdot (t + \Delta t_i)^2, i = 1..n, j = 1..k, \quad (2)$$

где c_1 - скорость распространения поперечной волны;
 c_2 - скорость распространения продольной волны;
 c_3 - скорость распространения волны Лэмба (в плоских пластинах).

Система равенств (2) также решается методом линеаризации, но уже только относительно (x, y) .

Локация источников АЭ

Локация — установление положения источника в заданной системе координат по зарегистрированным сигналам акустической эмиссии.

ГОСТ Р ИСО 12716–2009. Контроль неразрушающий. Акустическая эмиссия.

Словарь терминов.

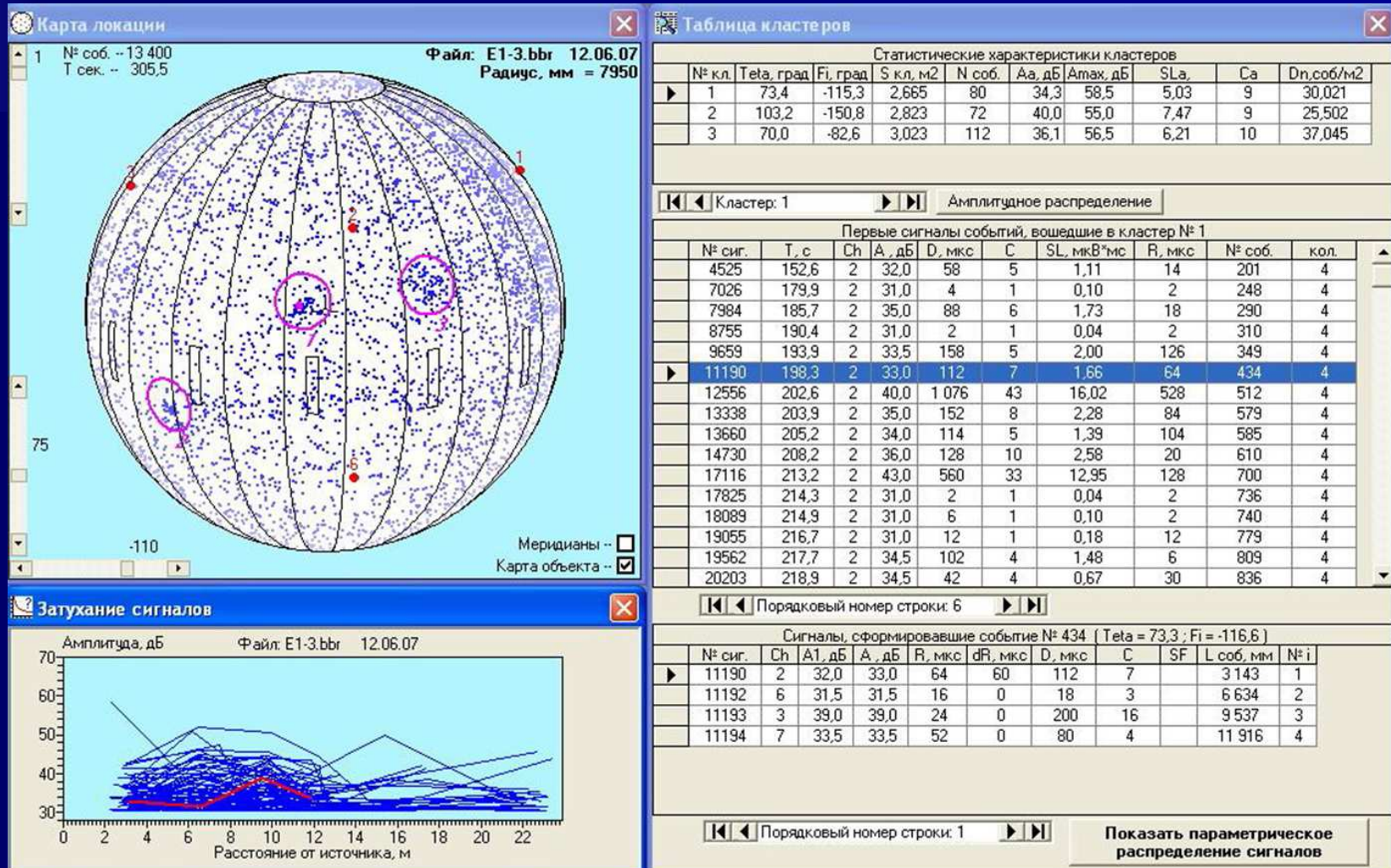
Вид локации	Определение положения источника АЭ	Количество датчиков
Линейная	На линии между датчиками	2
Планарная	На поверхности объекта	3 или более
Трёхмерная	В объёме объекта	5 или более
Зонная	Только область расположения на объекте	Произвольное

Локация источников АЭ

Принципиальная схема локации по результатам АЭ тестирования:

- Формируется таблица сигналов, упорядоченная по времени прихода.
- Производится фильтрация механических шумов, электромагнитных помех и сигналов от утечек.
- Определяются координаты источников АЭ.
- Выполняется кластеризация источников АЭ.

Локация источников АЭ



Вейвлет-преобразование и преобразование Фурье

- Применение вейвлет-преобразования в области акустической эмиссии началось в 1996 г.
- Вейвлет-спектрограмма (непрерывное вейвлет-преобразование) представляет собой специальное преобразование сигнала, которое позволяет показать распределение энергии сигнала как по времени, так и по частоте.

Suzuki H., Kinjo T., Hayashi Y., Takemoto M., Ono K., Appendix by Hayashi Y., Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals, Journal of Acoustic Emission, Vol. 14, No.2, 1996, April-June, pp. 69-84.

Вейвлет-преобразование и преобразование Фурье

- Подобные возможности дает и оконное преобразование Фурье, однако оно отличается меньшей разрешающей способностью, ограниченным частотным диапазоном и большим, по сравнению с вейвлетами, количеством вычислений, необходимым для его получения.
- Вейвлет-анализ АЭ сигналов позволяет улучшать фильтрацию шумов, разделять акустические моды, а также предоставляет альтернативный способ определения координат источника АЭ.

Основные проблемы локации источников АЭ

- Погрешность при использовании пороговых методов регистрации может достигать до 20%.
- Сложности в анизотропных структурах. Локация источников АЭ в трёхмерных анизотропных структурах (композиты), представляет трудности из-за сложных путей распространения волн и неоднородности материалов.
- Неточности при близком расположении источников и датчиков. Высокочастотные компоненты сигнала влияют на скорость его распространения.

Современные подходы к локации источников АЭ

- Применение методов машинного обучения, таких как **SVR-GBR**, позволяет повысить точность локации в сложных структурах, например, в горных породах.
- Разработка нейронных сетей, учитывающих анизотропию композитных материалов, позволяет достичь средней погрешности локации около 3 мм.
- Байесовские подходы обеспечивают более информативные результаты, особенно в структурах со сложной геометрией, за счёт вероятностного моделирования и учёта неопределённостей.

Перспективы и направления развития

- Разработка методов, учитывающих сложные пути распространения волн и неоднородности материалов, остаётся приоритетной задачей.
- Сочетание искусственного интеллекта с классическими подходами может привести к созданию более надёжных и точных систем локации источников АЭ.
- Создание алгоритмов, способных эффективно работать с объектами сложной геометрической формы, позволит расширить область применения метода АЭ.

Массив датчиков (Олег Просеков)

- Группа сенсоров в определённой геометрической конфигурации.
- Сбор и обработка электромагнитных или акустических сигналов.
- Пространственная избыточность улучшает точность оценок.

Обработка сигналов массива

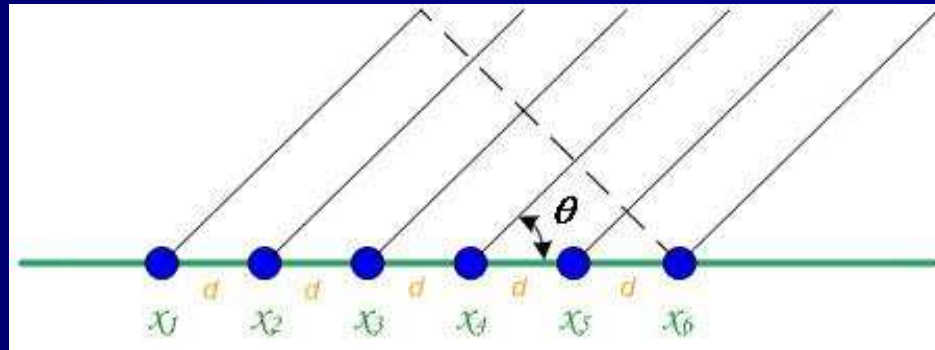
- Оценка временных и пространственных характеристик сигналов.
- Методы:
 - Оценка параметров.
 - Формирование луча (beamforming).
- Усиление сигнала в заданном направлении, подавление помех.

Формирование луча во временной области

- Используется задержка и суммирование сигналов.
- Усиление сигнала из определённого направления.
- Подавление сигналов из других направлений.
- Эффективно для обработки плоских волн.

Геометрические конфигурации

- Линейные, кольцевые, плоские, цилиндрические, сферические.
- Пример: равномерный линейный массив (ULA).



Модель сигнала

Для узкополосного сигнала $s(t)$, поступающего под углом θ , сигнал, принимаемый n -м датчиком в равномерном линейном массиве (ULA), описывается следующим образом:

$$x_n(t) = s(t - \tau_n) + w_n(t), \quad \tau_n = \frac{nd \sin \theta}{c}$$

где:

- d — расстояние между соседними элементами массива,
- c — скорость распространения волны,

В частотной области

$$x_n(t) = s(t) \cdot e^{-j\omega\tau_n} + w_n(t)$$

Вектор направленности (steering vector) для угла θ :

$$a_k(\theta) = e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}k d \sin \theta}$$

где λ — длина волны сигнала, а k — индекс сенсора в массиве.

Выход пространственного фильтра (beamforming)

$$y(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t)$$

где:

- $\mathbf{w}$ — вектор весов (фазовых и амплитудных коэффициентов),
- $\mathbf{x}(t)$ — вектор сигналов, поступающих с массива сенсоров.

Антенные массивы

- Фазированные антенные решётки: управление направленностью излучения.
- Умные антенны: цифровая обработка сигналов.
- Интерферометрические массивы: высокое разрешение в радиоастрономии.

Акустические массивы

- Массивы микрофонов: пространственная фильтрация звука.
- Массивы гидрофонов: обнаружение и локализация подводных объектов.

Другие массивы

- Массивы геофонов: регистрация землетрясений.
- Массивы химических датчиков: анализ химических смесей.

Применение

- Радар и сонар: обнаружение и отслеживание объектов.
- Беспроводные коммуникации: улучшение качества сигнала.
- Сейсмология: мониторинг сейсмической активности.
- Астрономия: наблюдение космических объектов.
- Мониторинг оборудования: раннее обнаружение неисправностей.