

УДК 620.192.6

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-30-38

Применение пространственной корреляции параметров сигналов акустической эмиссии для решения задач кластеризации источников

А. А. Попков, Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия
С. А. Бехер, доктор технических наук, профессор, Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

Одна из определяющих задач, без решения которой невозможна реализация неразрушающего контроля методом акустической эмиссии (АЭ), связана с повышением достоверности объединения источников в кластеры и обоснованием комплекса информативных параметров сигналов для описания свойств источников АЭ. В работе предложена модель параметров сигналов, зарегистрированных несколькими преобразователями от одного источника АЭ и содержащих случайные мультипликативные и аддитивные неопределенности. В рамках аналитического решения модели показано, что требований независимости неопределенностей параметров сигналов между собой и с параметрами источника достаточно для доказательства утверждения, что информативные параметры сигналов на двух преобразователях коррелируют с параметром источника тогда и только тогда, когда они коррелируют между собой.

Обоснована возможность использования коэффициента корреляции параметров сигналов с двух преобразователей для оценки степени информативности этих параметров и их связи с источником. Приведены результаты экспериментальных исследований на стальном сосуде давления и листовом стекле с использованием электронного имитатора, имитатора Су-Нильсена, реальных источников при гидравлическом и ударном нагружении. Предложен и реализован способ кластеризации сигналов, основанный на обработке зависимостей параметров сигналов, зарегистрированных тремя преобразователями. Показана сходимость полученных результатов с локацией источников в листовом стекле, основанной на классическом алгоритме по разности времен прихода сигналов, в стандартном программном обеспечении АЭ-системы СЦАД-16.03.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, акустическая эмиссия, параметры сигналов акустической эмиссии, информативные параметры, локация источников, корреляция, коэффициент корреляции, кластеризация источников.

Введение

Современный уровень развития аппаратуры акустико-эмиссионного контроля обеспечивает возможность регистрации полной цифровой формы акустических сигналов. При этом на этапе обработки экспериментальных данных используются наборы амплитудных, временных, частотных и корреляционных параметров этих сигналов, по которым определяют координаты, проводят кластеризацию, идентификацию и оценивают степень опасности источников акустической эмиссии (АЭ) [1, 2]. В настоящее время только для оценки амплитудных и энергетических свойств источника используется более восьми первичных и вычисляемых параметров, таких как амплитуда, размах, электрическая мощность и уровень сигнала, средняя мощность, среднее квадратическое отклонение, энергия сигнала и энергетический параметр *MARSE*.

Выбор того или иного параметра является нетривиальной задачей, связанной с поиском максимальной корреляционной связи с параметрами источников АЭ и, следовательно, ми-

нимизацией влияния как систематических, так и случайных искажений в процессе распространения акустических сигналов в объекте контроля. В отдельных относительно простых случаях закономерности изменения параметров сигналов при распространении акустического импульса могут быть определены аналитически в рамках упрощенной физической модели [3]. Например, размах сигнала по сравнению с амплитудой позволяет учесть несимметричность преобразователя и смену фазы при отражении волны от границ объекта контроля. Энергия сигнала и параметр *MARSE* за счет суммирования дискретного сигнала на временном интервале компенсируют уменьшение амплитуды, связанное с дисперсией волн в объекте контроля [4–6]. Среднее квадратическое отклонение снижает негативный эффект переотражений в объекте контроля, которые при незначительных изменениях диаграммы направленности источника АЭ вызывают существенные изменения мгновенных значений сигнала.

Для производственных объектов, имеющих сложную форму и состоящих из нескольких

разноразмерных элементов, аналитические методы анализа физических моделей АЭ для выбора параметров сигналов не обеспечивают необходимую достоверность, а в отдельных случаях – невозможны [7, 8]. Альтернативные им численные решения акустического тракта требуют специальной подготовки, программного обеспечения и достаточно мощной вычислительной аппаратуры. Поэтому актуальной является задача создания экспериментальных методов определения степени корреляционной связи параметров сигналов с параметрами источника АЭ и разработки способов использования этой связи для идентификации и кластеризации источников АЭ.

Целью работы является исследование устойчивости параметров сигналов АЭ к малозначительным изменениям параметров источника АЭ для решения задачи обоснованного выбора параметров сигналов и кластеризации источников АЭ.

Постановка задачи

В зависимости от решаемой научно-технической задачи источник АЭ характеризуется параметром P_s – амплитудой смещений первоначального воздействия, выделяющейся упругой энергией или размером образовавшейся несплошности. Традиционно для регистрации акустических волн, возбуждаемых источником АЭ, используются два и более преобразователя АЭ (ПАЭ), по сигналам которых судят о вызывающих акустическое излучение процессах. Исключение составляет зонная локация (сигналы источника

регистрируются одним преобразователем), которая в настоящей работе не рассматривается.

Одна из основных задач метода АЭ заключается в решении обратной задачи – определении параметров источника P_s по параметрам P_{AE} регистрируемых сигналов (рис. 1). Для существования такого решения необходимо и достаточно наличие взаимного однозначного отображения P_s в P_{AE} , что в свою очередь устанавливает ограничения на функцию $P_{AE}(P_s)$, которая должна быть либо монотонно возрастающей, либо убывающей на всей области определения. Прямая экспериментальная проверка выполнения этого условия требует значительных материальных затрат и сложной аппаратуры для непосредственного измерения параметров источника P_s .

Для решения поставленной задачи перспективно использовать связь параметров сигналов P_{AE1} и P_{AE2} , зарегистрированных разными ПАЭ от одного источника (рис. 2). Предположим, что параметры сигналов являются гладкими (непрерывными и дифференцируемыми на всей области определения) функциями параметра источника P_s (рис. 2, а):

$$P_{AE1} = f_1(P_s), \tag{1}$$

$$P_{AE2} = f_2(P_s). \tag{2}$$

Функции (1) и (2) задают параметрическую функцию $P_{AE1} = \varphi(P_{AE2})$, производная которой определяется выражением:

$$\frac{dP_{AE1}}{dP_{AE2}} = \frac{dP_{AE1}}{dP_s} / \frac{dP_{AE2}}{dP_s}. \tag{3}$$

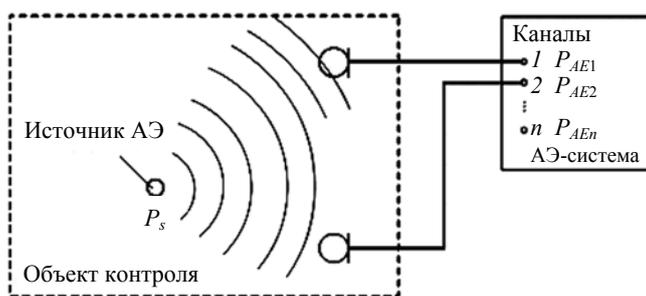


Рис. 1. Схема регистрации параметров сигналов АЭ

Очевидно, что если в правой части уравнения (3) функции (1) и (2) являются строго возрастающими или убывающими, то их производные имеют одинаковый знак и правая часть неравенства строго положительна. С другой стороны, если левая часть неравенства (3) положительна во всей области определения функции $P_{AE1} = \varphi(P_{AE2})$, то числитель и знаменатель пра-

вой части также будут являться строго положительными или отрицательными, так как в противном случае правая часть неравенства может обратиться в ноль или в бесконечность. Таким образом, критерием взаимно-однозначной функции, связывающей параметры источника и регистрируемого сигнала АЭ, является взаимная однозначность двух параметров сигналов, регистрируемых двумя различными ПАЭ.

Полученный выше вывод справедлив только для гладких, дифференцируемых во всей области определения функций. На практике параметры сигналов АЭ являются случайными величинами, на которые оказывают влияние процессы: распространения в объекте контроля (переотражения, дисперсия, дифракция), искажения и шумы в преобразователях и электроакустическом тракте АЭ-системы [9, 10]. Для анализа случайных величин эффективным критерием их взаимно-однозначного соответствия является коэффициент корреляции [11, 12]. Рассмотрим модель, в которой параметры сигналов АЭ, ре-

гистрируемых первым и вторым ПАЭ, связаны с параметром источника в некоторой области $P_S \in (P_{Smin}, P_{Smax})$ линейными зависимостями со случайными независимыми мультипликативными и аддитивными коэффициентами (см. рис. 2, б):

$$P_{AE1} = (a_1 + \delta_1) \cdot P_S + (b_1 + \Delta_1), \quad (4)$$

$$P_{AE2} = (a_2 + \delta_2) \cdot P_S + (b_2 + \Delta_2), \quad (5)$$

где a_1, a_2, b_1, b_2 – постоянные коэффициенты, $\delta_1, \delta_2, \Delta_1, \Delta_2$ – случайные коэффициенты, которые попарно не коррелируют и не связаны с P_S .

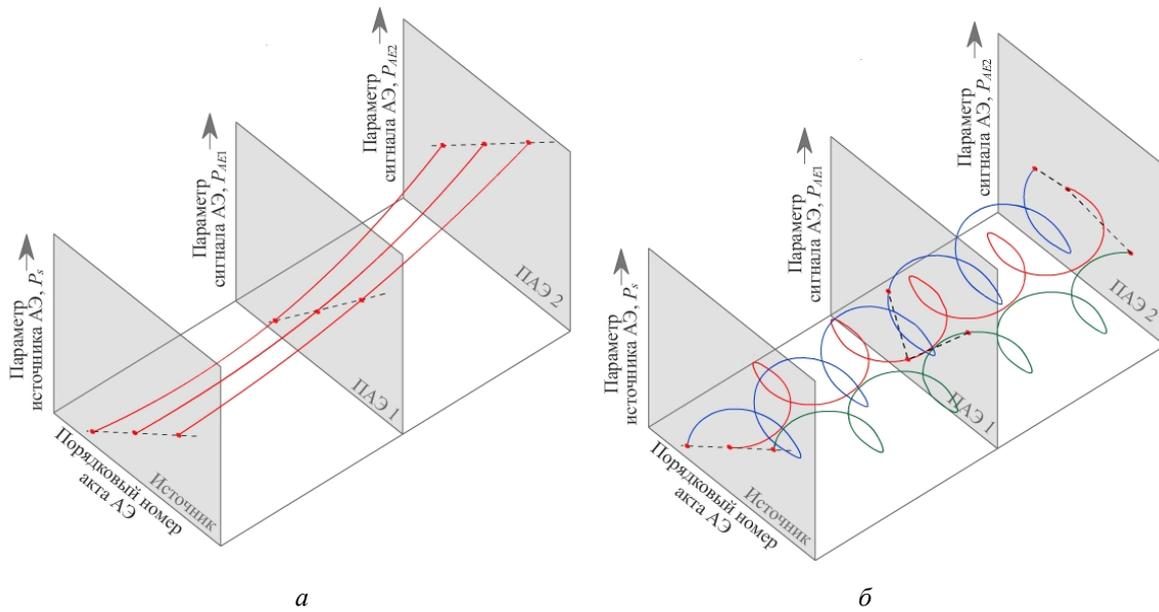


Рис. 2. Отображение параметра источника на параметры сигналов, зарегистрированных двумя преобразователями: детерминированное (а) и случайное (б)

Постоянные коэффициенты a_1, a_2, b_1, b_2 всегда могут быть выбраны таким образом, чтобы средние значения случайных коэффициентов $\delta_1, \delta_2, \Delta_1, \Delta_2$ равнялись нулю $\langle \delta_1 \rangle = \langle \delta_2 \rangle = \langle \Delta_1 \rangle = \langle \Delta_2 \rangle = 0$. Для упрощения дальнейших вычислений могут быть выполнены переобозначения в выражении (4): $(P_{AE1} - b_1)/a_1 \rightarrow P_{AE1}, \delta_1/a_1 \rightarrow \delta_1, \Delta_1/a_1 \rightarrow \Delta_1$, для выражения (5) аналогично. Тогда выражения (4) и (5) примут вид:

$$P_{AE1} = (1 + \delta_1) \cdot P_S + \Delta_1, \quad (6)$$

$$P_{AE2} = (1 + \delta_2) \cdot P_S + \Delta_2. \quad (7)$$

Коэффициент корреляции параметров P_{AE1} и P_S определяется выражением:

$$cor(P_{AE1}, P_S) = \frac{(P_{AE1} - P_{AE1}) \cdot (P_S - P_S)}{\sqrt{D(P_{AE1}) \cdot D(P_S)}}, \quad (8)$$

где $D(A)$ и $\langle A \rangle$ – дисперсия и среднее значение аргумента A .

После подстановки (6) в (8) и вычисления среднего в числителе с учетом того, что случайные величины δ_1 и Δ_1 не зависят от параметра источника P_S и имеют нулевое среднее значение, выражение для коэффициентов корреляции параметров сигналов с параметром источника могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned} cor(P_{AE1}, P_S) &= \\ &= \frac{\langle P_S^2 + \delta_1 \cdot P_S^2 + \Delta_1 \cdot P_S - P_S \cdot \langle P_S \rangle - \delta_1 \cdot P_S \cdot \langle P_S \rangle - \Delta_1 \cdot \langle P_S \rangle \rangle}{\sqrt{D(P_{AE1}) \cdot D(P_S)}} = \\ &= \frac{D(P_S)}{\sqrt{D(P_{AE1}) \cdot D(P_S)}}. \end{aligned} \quad (9)$$

$$cor(P_{AE2}, P_S) = \frac{D(P_S)}{\sqrt{D(P_{AE2}) \cdot D(P_S)}}. \quad (10)$$

Корреляция параметров сигналов между собой определяется выражением:

$$cor(P_{AE1}, P_{AE2}) = \frac{\langle (P_{AE1} - \langle P_{AE1} \rangle) \cdot (P_{AE2} - \langle P_{AE2} \rangle) \rangle}{\sqrt{D(P_{AE1}) \cdot D(P_{AE2})}}. \quad (11)$$

После подстановки (6) и (7) в (11) числитель принимает вид:

$$\begin{aligned} & \langle (P_{AE1} - \langle P_{AE1} \rangle) \cdot (P_{AE2} - \langle P_{AE2} \rangle) \rangle = \\ & = \langle P_S^2 + (\delta_1 + \delta_2) \cdot P_S^2 + \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot P_S^2 + \Delta_2 \cdot P_S + \\ & + \delta_1 \cdot \Delta_2 \cdot P_S - \langle P_S \rangle \cdot P_S - \delta_1 \cdot \langle P_S \rangle \cdot P_S + \Delta_1 \cdot P_S + \\ & + \Delta_1 \cdot \delta_2 \cdot P_S + \Delta_1 \cdot \Delta_2 - \Delta_1 \cdot \langle P_S \rangle - \\ & - \langle P_S \rangle \cdot P_S - \delta_2 \cdot \langle P_S \rangle \cdot P_S - \Delta_2 \cdot \langle P_S \rangle + \langle P_S \rangle^2 \rangle. \quad (12) \end{aligned}$$

Учитывая, что случайные коэффициенты δ_1 и δ_2 в (12) не коррелируют с параметром источника P_S , по аналогии с (9) выражение (11) упрощается:

$$\begin{aligned} & cor(P_{AE1}, P_{AE2}) = \\ & = \frac{\langle P_S^2 \rangle - \langle P_S \rangle^2 + \langle \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot P_S^2 + \delta_1 \cdot \Delta_2 \cdot P_S^2 + \delta_2 \cdot \Delta_1 \cdot P_S^2 + \Delta_1 \cdot \Delta_2 \rangle}{\sqrt{D(P_{AE1}) \cdot D(P_{AE2})}}. \quad (13) \end{aligned}$$

Так как по условию средние значения всех комбинаций произведения случайных составляющих неопределенностей на двух разных каналах $\langle \delta_1 \cdot \delta_2 \rangle = \langle \delta_1 \cdot \Delta_2 \rangle = \langle \delta_2 \cdot \Delta_1 \rangle = \langle \Delta_1 \cdot \Delta_2 \rangle = 0$, что эквивалентно требованию отсутствия корреляции ними, то выражение (13) упрощается:

$$cor(P_{AE1}, P_{AE2}) = \frac{D(P_S)}{\sqrt{D(P_{AE1}) \cdot D(P_{AE2})}}. \quad (14)$$

Постановка (9) и (10) в (14) позволяет установить связь коэффициентов корреляции параметров сигналов между собой и с параметрами источника:

$$\begin{aligned} & cor(P_{AE1}, P_{AE2}) = \\ & = cor(P_{AE1}, P_S) \cdot cor(P_{AE2}, P_S). \quad (15) \end{aligned}$$

Коэффициент корреляции параметров сигналов, имеющих случайные аддитивные и мультипликативные составляющие неопределенности измерений, равен единице тогда и только

тогда, когда коэффициенты корреляции параметров этих сигналов с параметрами источника равны единице, при условии, что неопределенности сигналов не коррелируют с параметром источника и между собой. Таким образом, при выборе информативных параметров сигналов для оценки тесноты их корреляционной связи с параметрами источника может использоваться коэффициент корреляции параметров сигналов с двух ПАЭ.

Описание эксперимента и основные результаты

Сигналы акустической эмиссии регистрировались диагностической цифровой акустико-эмиссионной системой СЦАД 16.03 (№ 18892-10 в Государственном реестре средств измерений) с тремя-четырьмя ПАЭ типа ПК-01-07 с полосой пропускания от 0,1 до 0,7 МГц. Пороговый уровень фиксации составлял 5 мкВ на входе предварительного усилителя. В системе в цифровой форме сохранялись сигналы акустической эмиссии длительностью до 4 мс, по которым рассчитывался весь комплекс амплитудных и энергетических параметров сигналов: амплитуда U_m , размах R_{AE} , среднее квадратическое отклонение (СКО) $U_{СК}$, среднее модуля сигнала Z_{AE} и энергетический параметр сигнала акустической эмиссии $MARSE$.

Объектами контроля являлись сосуды давления диаметром 220 мм и длиной 1150 мм, изготовленные из стали 20 по ГОСТ 1050-2013 с толщиной стенки 6 мм, лист стеклянный 200×300×2 мм по ГОСТ 111-2014. В качестве источника АЭ применялись: электронный имитатор с амплитудой от 0,5 до 30 В и длительностью фронта не более 1 мкс, имитатор Су-Нильсена по ГОСТ Р ИСО 22096-2015, реальные источники сигналов при ударном нагружении стекла и при гидравлических испытаниях сосуда давления.

Наибольший коэффициент корреляции амплитудных параметров сигналов двух преобразователей реализуется в экспериментах с электронным имитатором (рис. 3), что связано с его стабильностью как источника сигнала. ПАЭ электронного имитатора устанавливался на поверхность сосуда в двух местах (см. рис. 3, а). Сигналы АЭ возбуждались передним и задним фронтом прямоугольного импульса, амплитуда которого варьировалась в диапазоне от 0,5 до 30 В.

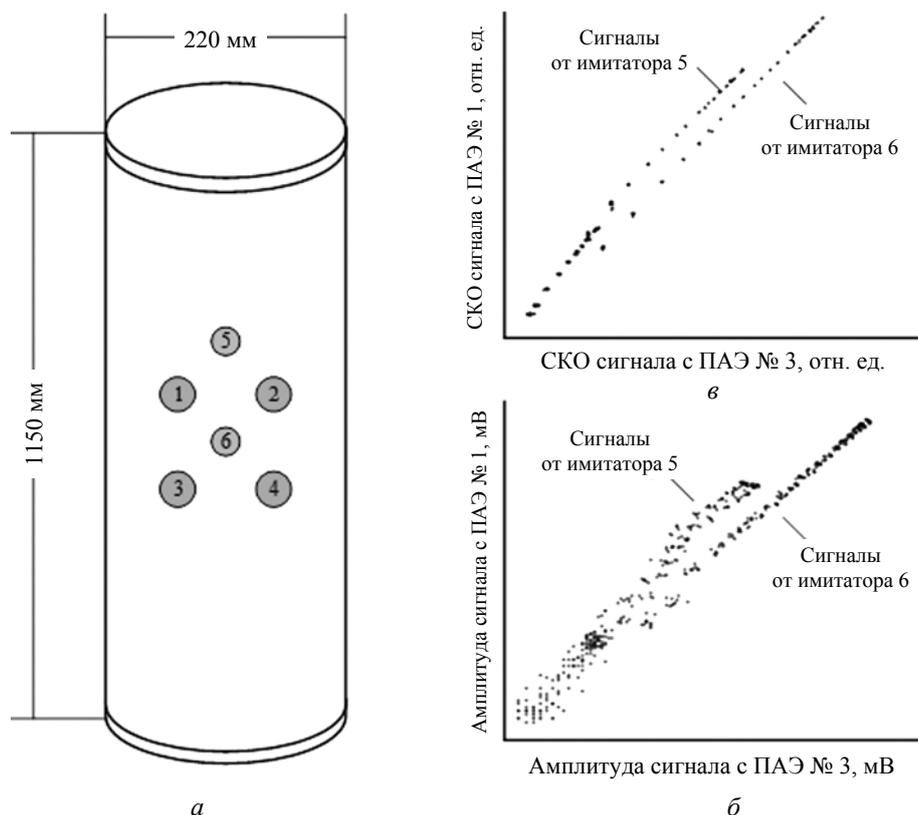


Рис. 3. Экспериментальные исследования зависимости амплитудных параметров сигналов, возбуждаемых электронным имитатором в точках 5 и 6 и регистрируемых ПАЭ 1–4: а – схема расположения источников и приемников; б – СКО сигналов, в – амплитуда

Сигналы АЭ регистрировались ПАЭ, установленные в виде прямоугольной пьезоантенны. Зависимость СКО сигналов на 1 и 3 ПАЭ характеризуется наличием двух областей с выраженной линейной зависимостью и коэффициентом корреляции более $R > 0,99$ (см. рис. 3, б), которые соответствуют сигналам от имитатора, установленного в точках 5 и 6. Зависимость амплитуды сигналов, зарегистрированных 1 и 3 ПАЭ, аппроксимируется линейной функцией с меньшими значениями коэффициента корреляции $R = 0,92$. Это вызвано несимметричностью коэффициентов преобразования пары источник-приемник при возбуждении сигналов положительным и отрицательным фронтом импульса генератора. Тем не менее сигналы от двух ис-

точников уверенно разделяются (см. рис. 3, в), а полученный эффект несимметричности амплитуды также может быть использован для решения отдельных задач идентификации источников АЭ.

В экспериментах с ударным нагружением на стеклянном листе предварительно создавалась трещина длиной 10–15 мм (рис. 4). Листы фиксировались на металлической подложке толщиной 2 мм с помощью зажимов, расположенных по углам листа. Между рабочей поверхностью зажимов и поверхностью листа, а также между листом и металлической подложкой размещались демпфирующие картонные прокладки. На расстояниях 10 мм от углов устанавливались три ПАЭ.

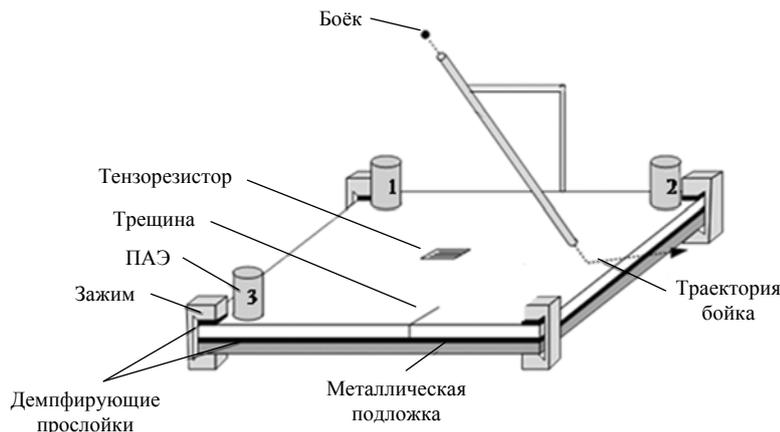


Рис. 4. Схема эксперимента по исследованию АЭ при ударном нагружении листового стекла с трещиной

После серии ударов бойком наблюдается замедленный рост трещины с одновременным повышением активности АЭ. В работе [13] показано, что источниками сигналов являются процессы, сопровождающие рост трещины, смещение кромок трещины и их релаксацию после деформаций, после прекращения воздействия стального бойка. Для анализа зависимости

параметров сигналов, зарегистрированных разными преобразователями, использовалось СКО сигналов, так как в ходе предварительных экспериментов с имитатором Су-Нильсена этот параметр обеспечил максимальный коэффициент корреляции $R > 0,98$. Коэффициенты корреляции для других рассматриваемых параметров приведены в таблице.

Коэффициенты корреляции параметров сигналов АЭ

Параметр	Коэффициент корреляции		
	ПАЭ 1 – ПАЭ 2	ПАЭ 1 – ПАЭ 3	ПАЭ 2 – ПАЭ 3
Амплитуда U_m	0,83	0,84	0,83
Размах R_{AE}	0,87	0,85	0,87
Среднее квадратическое отклонение (СКО) $U_{СК}$	0,98	0,97	0,98
Среднее модуля сигнала Z_{AE}	0,91	0,89	0,89
Энергетический параметр $MARSE$	0,95	0,96	0,93

Для общего потока зарегистрированных в испытаниях АЭ-сигналов коэффициент корреляции зависимости СКО на ПАЭ 2 и 3 значительно меньше ($R < 0,4$), чем для сигналов, источниками которых являлся электронный имитатор. В общем потоке наблюдается несколько линейных зависимостей (рис. 5), связанных с ра-

ботой различных источников АЭ. На рис. 5, а наблюдаются три выраженные линейные зависимости, обозначенные цифрами 1, 2 и 3 с разными коэффициентами пропорциональности $a = 2,02, 1,57$ и $0,46$ соответственно:

$$y = a \cdot x, \tag{16}$$

где a – коэффициент пропорциональности.

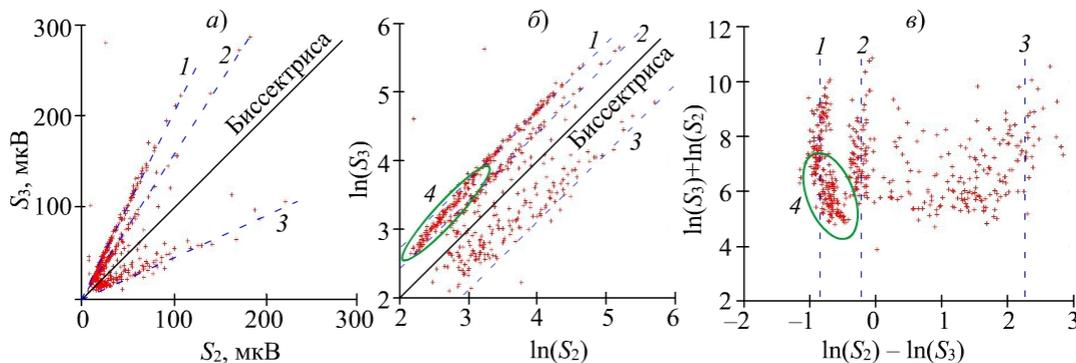


Рис. 5. Зависимость СКО сигналов 3-го канала от СКО сигналов 2-го канала: а – в пропорциональных осях; б – в логарифмических осях; в – в логарифмических осях, повернутых на 45° против часовой стрелки

Для идентификации источников предложен алгоритм, основанный на нормализации графика и переходе от линейного масштаба осей к логарифмическому (рис. 5, б):

$$\ln(y) = \ln(x) + \ln(a). \quad (17)$$

Это позволило привести мультипликативную составляющую a к аддитивному виду $\ln(a)$. В логарифмических осях все линейные зависимости являются параллельными с коэффициентом пропорциональности, близким к 1. При этом информативным параметром, по которому зависимости различаются, является коэффициент смещения линейной зависимости $\ln(a)$.

Вторым шагом алгоритма является поворот осей на 45° против часовой стрелки (рис. 5, в). При этом исходные линейные зависимости с коэффициентом пропорциональности a преобразуются в вертикальные линии, параллельные оси ординат, смещение которых в горизонтальном направлении по оси абсцисс равно логарифму коэффициента a :

$$\ln(y) - \ln(x) = \ln\left(\frac{y}{x}\right) = \ln(a). \quad (18)$$

На зависимости 1 (см. рис. 5, в) наблюдается отклонение группы низкоамплитудных сигналов от прямой линии 4. СКО этих сигналов незначительно превышает уровень собственных шумов

аппаратуры. Сигналы являются «хвостами» АЭ-импульсов и связаны с повторной регистрацией из-за того, что за время ожидания АЭ-системы амплитуда импульса не успела уменьшиться ниже установленного порога фиксации [14].

Для визуализации и оценки достоверности алгоритма кластеризации на примере сигналов, полученных при ударных нагружениях стекла, построены карты локации источников в программном обеспечении системы СЦАД-16.03 (рис. 6, а, в) для двух последовательных потоков сигналов. Одновременно на рис. 6, б, г представлены двухмерные цветовые карты распределения количества источников АЭ по значениям коэффициента $\ln(a)$, рассчитанного по СКО сигналов S_1, S_2, S_3 с 1-го, 2-го и 3-го ПАЭ соответственно

На обеих картах наблюдаются два основных кластера, связанных с источниками АЭ-сигналов из двух разных участков образца. Количество сигналов в обоих кластерах одинаково изменяется во времени: во втором кластере увеличивается, а в первом уменьшается. Количество сигналов, кластеризованных с использованием предложенного алгоритма по амплитудным параметрам сигналов, в 1,5 превышает количество локализованных по времени прихода, что связано с пропусками низкоамплитудных сигналов в алгоритмах локации по времени прихода [15].

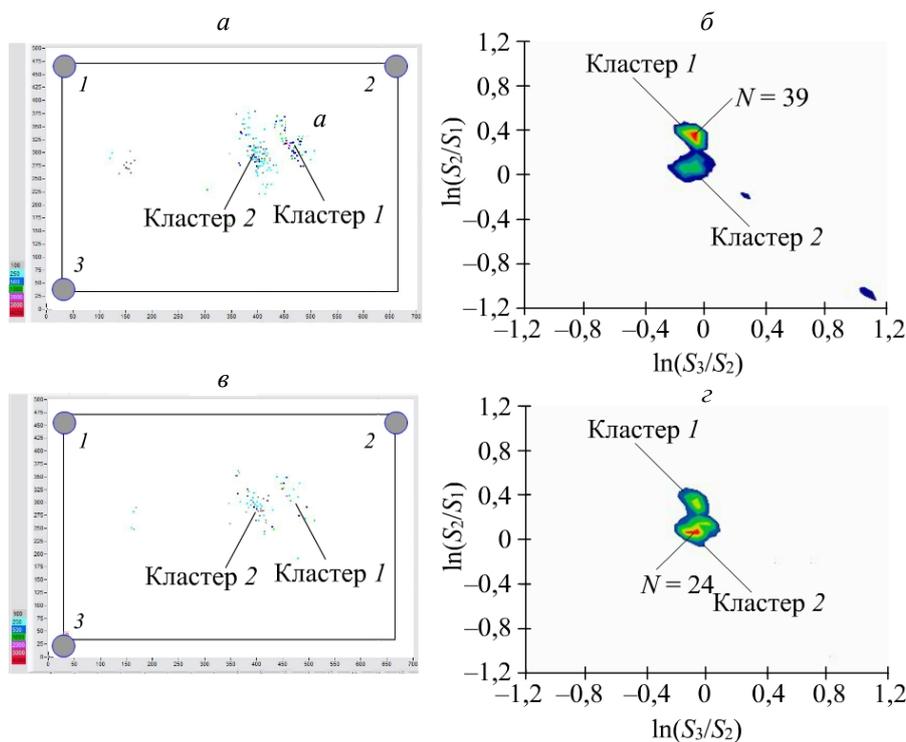


Рис. 6. Кластеризация источников АЭ при ударном нагружении листового стекла по сигналам с порядковым номером $n = 1000 \dots 1500$ (а, б) и $n = 1500 \dots 2000$ (в, г): локация по времени прихода (а, в) и кластеризация по зависимости СКО сигналов на двух парах ПАЭ (б, г)

Анализ результатов и основные выводы

В рамках математической модели сигналов, информативные параметры которых линейно связаны с параметрами источника и содержат случайные и независимые аддитивные и мультипликативные составляющие неопределенности, показано, что коэффициент корреляции параметров сигналов, зарегистрированных от одного источника, равен 1 тогда и только тогда, когда коэффициенты корреляции параметров каждого из сигналов с параметром источника равны 1. Эффект может быть использован для обоснованного выбора из всего многообразия наиболее информативных амплитудных параметров сигналов, находящихся в наиболее тесной связи с источником АЭ, и решения задач кластеризации источников.

Корреляционным способом проведен сравнительный анализ устойчивости к случайным мешающим факторам амплитуды (коэффициентом корреляции $R = 0,92$) и СКО ($R = 0,92$) сигналов АЭ в стальных сосудах давления (диаметр – 220 мм, длина – 1150 мм, толщина стенки – 6 мм). Показано, что зависимости СКО сигналов с двух ПАЭ описываются линейными зависимостями, коэффициенты пропорциональности которых зависят от места расположения источника сигнала.

Предложен и реализован алгоритм кластеризации источников АЭ, основанный на обработке зависимостей параметров сигналов с разных ПАЭ. В экспериментах с ударным нагружением листового стекла удалось разделить поток сигналов на два кластера, соответствующие двум разным источникам сигналов. Используемый алгоритм кластеризации позволил идентифицировать не только высокоамплитудные сигналы, уверенно локализуемые по разности времен прихода, но и низкоамплитудные, СКО которых превышает СКО шума не более чем в 3–4 раза.

Библиографические ссылки

1. Муравьев В. В., Муравьева О. В. Оценка роста усталостных трещин в боковых рамах тележек грузовых вагонов акустико-эмиссионным методом // Деформация и разрушение материалов. 2016. № 9. С. 24–29.
2. The dependence of local deformations and internal stress fields on welding technique for grade vst3sp structural steel: I. The influence of welding technique on the mechanical characteristics and acoustic emission parameters of grade Vst3sp steel // Smirnov A.N., Ozhiganov E.A., Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Muravev V.V. // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. Т. 51. № 11. С. 705–712.
3. Аналитический метод моделирования сигналов акустической эмиссии в тонкостенных объектах / В. А. Барат, Д. А. Терентьев, В. В. Бардаков, С. В. Елизаров // Контроль. Диагностика. 2020. № 6. С. 23–29.
4. Evaluation of the danger degree of fatigue cracks in the acoustic emission testing of cast pieces of a freight-car truck / Stepanova L.N., Muravev V.V., Kareev A.E. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2003. Т. 39. № 1. С. 54–59.
5. The specific features of acoustic-emission testing of vessel equipment with a wall delamination of a technological origin / Rastegaev I.A., Vinogradov A.Y., Merson D.L., Danyuk A.V., Chugunov A.V. // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. Т. 51. № 5. С. 280–291.
6. Analysis of errors in location of flaws in multipass welds using different clustering methods / Stepanova L.N., Kabanov S.I., Ramazanov I.S., Kanifadin K.V. // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. Т. 53. № 2. С. 96–103.
7. Носов В. В., Потапов А. И. Акустико-эмиссионный контроль прочности сложонагруженных металлоконструкций // Дефектоскопия. 2015. № 1. С. 61–72.
8. Виноградов А. Ю., Мерсон Д. Л. Природа акустической эмиссии при деформационных процессах в металлических материалах // Физика низких температур. 2018. Т. 44. № 9. С. 1186–1195.
9. Контроль дефектов сварки стальных образцов по оценке энергии кластеров сигналов акустической эмиссии / Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов, В. В. Чернова, К. В. Канифадин // Контроль. Диагностика. 2019. № 10. С. 4–11.
10. Степанова Л. Н., Чернова В. В., Рамазанов И. С. Использование методов кластеризации для обработки акустико-эмиссионной информации // Контроль. Диагностика. 2019. № 8. С. 12–21.
11. A correlation analysis and invariant method of acoustic-emission signals in the diagnostics of pre-destruction states of materials / Builo S.I., Orlov S.V. // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. Т. 50. № 8. С. 464–468.
12. Буйло С. И. Об информативности метода инвариантов сигналов акустической эмиссии в задачах диагностики предразрушающего состояния материалов // Дефектоскопия. 2018. № 4. С. 18–23.
13. Bekher S.A. Applying impact loading for revealing cracks in glass by acoustic emission method / S.A. Bekher, A.A. Popkov // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. Т. 54. № 11. С. 741–747. DOI: 10.1134/S1061830918110025.
14. Локализация сигналов акустической эмиссии в металлических конструкциях / А. Н. Серьезнов, В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова, С. Б. Барабанова, В. Л. Кожемякин, С. И. Кабанов // Дефектоскопия. 1997. № 10. С. 79–84.
15. Reconstructing defect radiation amplitude based on acoustic emission signals under conditions of a plane stress state / Berkovich V.N., Builo S.I. // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. Т. 56. № 4. С. 328–339.

References

1. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V. [Evaluation of the growth of fatigue cracks in the side frames of freight car bogies by the acoustic emission method]. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2016. No. 9. Pp. 24-29 (in Russ.).
2. Smirnov A.N., Ozhiganov E.A., Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Muravev V.V. (2015). *Russian Journal of Nondestructive Testing*. Vol. 51. No. 11. Pp. 705-712.
3. Barat V.A., Terent'ev D.A., Bardakov V.V., Elizarov S.V. [An analytical method for modeling acoustic emission signals in thin-walled objects]. *Kontrol'. Diagnostika*. 2020. No. 6. Pp. 23-29 (in Russ.).
4. Stepanova L.N., Muravev V.V., Kareev A.E. (2003). *Russian Journal of Nondestructive Testing*. Vol. 39. No. 1. Pp. 54-59.
5. Rastegaev I.A., Vinogradov A.Y., Merson D.L., Danyuk A.V., Chugunov A.V. (2015) *Russian Journal of Nondestructive Testing*. Vol. 51. No. 5. Pp. 280-291.
6. Stepanova L.N., Kabanov S.I., Ramazanov I.S., Kanifadin K.V. (2017). *Russian Journal of Nondestructive Testing*. Vol. 53. No. 2. Pp. 96-103.
7. Nosov V.V., Potapov A.I. [Acoustic emission control of the strength of complex loaded metal structures]. *Defektoskopiya*. 2015. No. 1. Pp. 61-72 (in Russ.).
8. Vinogradov A.Yu., Merson D.L. [The nature of acoustic emission during deformation processes in metallic materials]. *Fizika nizkikh temperatur*. 2018. Vol. 44. No. 9. Pp. 1186-1195 (in Russ.).
9. Stepanova L.N., Kabanov S.I., Chernova V.V., Kanifadin K.V. [Inspection of welding defects in steel samples by evaluating the energy of clusters of acoustic emission signals]. *Kontrol'. Diagnostika*. 2019. No. 10. Pp. 4-11 (in Russ.).
10. Stepanova L.N., Chernova V.V., Ramazanov I.S. [Using clustering methods for processing acoustic emission information]. *Kontrol'. Diagnostika*. 2019. No. 8. Pp. 12-21 (in Russ.).
11. Builo S.I., Orlov S.V. (2014). *Russian Journal of Nondestructive Testing*. vol. 50. no. 8. pp. 464-468.
12. Builo S.I. [On the informativeness of the method of invariants of acoustic emission signals in the problems of diagnostics of the pre-destructive state of materials, the energy of clusters of acoustic emission signals]. *Defektoskopiya*. 2018. No. 4. Pp. 18-23 (in Russ.).
13. S.A. Bekher, A.A. Popkov (2018). *Russian Journal of Nondestructive Testing*. Vol. 54. No. 11. Pp. 741-747. DOI: 10.1134/S1061830918110025.
14. Ser'eznov A.N., Murav'ev V.V., Stepanova L.N., Barabanova S.B., Kozhemyakin V.L., Kabanov S.I. [Localization of acoustic emission signals in metal structures]. *Defektoskopiya*. 1997. No. 10. Pp. 79-84 (in Russ.).
15. Berkovich V.N., Builo S.I. (2020). *Russian Journal of Nondestructive Testing*. Vol. 56. No. 4. Pp. 328-339.

Application of Spatial Correlation of Acoustic Emission Signals Parameters to Solve Problems of Sources Clustering

A. A. Popkov, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

S. A. Bekher, DSc in Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

One of the defining tasks, without which it is impossible to implement non-destructive testing by the method of acoustic emission (AE), is associated with an increase in the reliability of combining sources into clusters and substantiation of a set of informative signal parameters for describing properties of AE sources. The paper proposes a model of signal parameters, registered by several transducers from one AE source and containing random multiplicative and additive uncertainties. As part of the analytical solution of the model, it is shown that the requirements of independence of uncertainties of signal parameters between each other and with source parameters are sufficient to prove the statement that informative parameters of signals at two transducers correlate with the source parameter if and only if they correlate between each other.

The possibility is substantiated for using the correlation coefficient parameters of signals from two transducers to assess these parameters' degree of information content and their relationship with the source. Results are given for experimental studies of a steel pressure vessel and sheet glass using an electronic simulator, a Su-Nielsen simulator, and real sources under hydraulic and shock loading. A method for signal clustering is proposed and implemented based on processing the dependences of parameters of signals recorded by three transducers. The convergence is shown for the results obtained with the source location in sheet glass based on the classical algorithm for time difference of signal arrival within the standard software AE-system SDSAD-16.03.

Keywords: non-destructive testing, acoustic emission, parameters of acoustic emission signals, informative parameters, source location, correlation, correlation coefficient, clustering sources.

Получено: 20.11.2020