

УДК: 004.67

## Метод обработки данных акустико-эмиссионного контроля для определения скорости и локации каждого сигнала

А. В. Григорьева<sup>1,a</sup>, М. В. Максименко<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет,  
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д. 2

E-mail: <sup>a</sup> a.v.grigorieva@spbu.ru, <sup>b</sup> maksimenko\_mv@pers.spmi.ru

*Получено 18.03.2022, после доработки — 19.06.2022.  
Принято к публикации 07.07.2022.*

Акустико-эмиссионный метод неразрушающего контроля является одним из эффективных и экономичных способов обследования сосудов высокого давления для поиска в них скрытых дефектов (трещин, расслоений и др.), а также единственным методом, чувствительным к развивающимся дефектам. Скорость распространения звука в объекте контроля и ее адекватное определение в локационной схеме имеют важнейшее значение для точности локации источника акустической эмиссии. Предложенный в статье метод обработки данных акустической эмиссии позволяет определить координаты источника и наиболее вероятную скорость для каждого сигнала. Метод включает в себя предварительную фильтрацию данных по амплитуде, по разности времен прихода, исключение электромагнитных помех. Далее к ним применяется комплекс численных методов для решения получившихся нелинейных уравнений, в частности метод Ньютона–Канторовича и общий итерационный процесс. Скорость распространения сигнала от одного источника принимается постоянной во всех направлениях. В качестве начального приближения берется центр тяжести треугольника, образованного первыми тремя датчиками, зафиксировавшими сигнал. Разработанный метод имеет важное практическое применение, и в статье приведен пример его апробации при калибровке акустико-эмиссионной системы на производственном объекте (абсорбере очистки углеводородного газа). Описаны критерии предварительной фильтрации данных. Полученные локации хорошо согласуются с местоположениями генерации сигналов, а вычисленные скорости четко отражают разделение акустической волны на волны Лэмба и Рэлея благодаря разноудаленности источников сигналов от датчиков. В статье построен график соответствия усредненной скорости сигнала и расстояния от его источника до ближайшего датчика. Основным достоинством разработанного метода можно считать его способность вычислять и отображать на общей схеме объекта местоположение сигналов, имеющих разные скорости, а не задавать единую скорость для всех сигналов акустической эмиссии в рамках одного расчета. Это позволяет увеличить степень свободы при вычислениях и тем самым увеличить их точность.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, метод Ньютона–Канторовича, калибровка, локация, метод итераций, дефекты

Работа выполнена в рамках проекта Санкт-Петербургского государственного университета ID 93024916.

UDC: 004.67

## Method for processing acoustic emission testing data to define signal velocity and location

A. V. Grigorieva<sup>1,a</sup>, M. V. Maksimenko<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg state university,  
7/9 Universitetskaya embankment, St. Petersburg, 199034, Russia

<sup>2</sup>Saint Petersburg mining university,  
2 21st line, St. Petersburg, 199106, Russia

E-mail: <sup>a</sup> a.v.grigorieva@spbu.ru, <sup>b</sup> maksimenko\_mv@pers.spmi.ru

*Received 18.03.2022, after completion — 19.06.2022.*

*Accepted for publication 07.07.2022.*

Non-destructive acoustic emission testing is an effective and cost-efficient way to examine pressure vessels for hidden defects (cracks, laminations etc.), as well as the only method that is sensitive to developing defects. The sound velocity in the test object and its adequate definition in the location scheme are of paramount importance for the accurate detection of the acoustic emission source. The acoustic emission data processing method proposed herein comprises a set of numerical methods and allows defining the source coordinates and the most probable velocity for each signal. The method includes pre-filtering of data by amplitude, by time differences, elimination of electromagnetic interference. Further, a set of numerical methods is applied to them to solve the system of nonlinear equations, in particular, the Newton–Kantorovich method and the general iterative process. The velocity of a signal from one source is assumed as a constant in all directions. As the initial approximation is taken the center of gravity of the triangle formed by the first three sensors that registered the signal. The method developed has an important practical application, and the paper provides an example of its approbation in the calibration of an acoustic emission system at a production facility (hydrocarbon gas purification absorber). Criteria for pre-filtering of data are described. The obtained locations are in good agreement with the signal generation sources, and the velocities even reflect the Rayleigh-Lamb division of acoustic waves due to the different signal source distances from the sensors. The article contains the dependency graph of the average signal velocity against the distance from its source to the nearest sensor. The main advantage of the method developed is its ability to detect the location of different velocity signals within a single test. This allows to increase the degree of freedom in the calculations, and thereby increase their accuracy.

**Keywords:** acoustic emission, Newton–Kantorovich method, calibration, location, iteration method, defects

*Citation:* *Computer Research and Modeling*, 2022, vol. 14, no. 5, pp. 1029–1040 (Russian).

Supported by Saint Petersburg State University, project ID: 93024916.

## Введение

К традиционным методам неразрушающего контроля (НК) относятся ультразвуковой, радиационный и магнитный. Еще одним эффективным и экономичным методом НК является акустико-эмиссионный контроль (АЭК). Его целью является обнаружение, определение местоположения и степени опасности источников акустической эмиссии (АЭ), связанных с развивающимися дефектами в контролируемом объекте. Метод АЭК хорошо себя зарекомендовал в различных сферах производства и для различных материалов: композиты, горные породы, подшипники, сосуды давления, трубопроводы, опоры мостов, бетонные защитные кожухи [Ono, 2018; Растегаев и др., 2018; Gomera, Grigorieva, 2020]. Однако одна из основных причин непопадания дефектов в зоны дополнительного контроля — неточности локации, связанные с погрешностью при выборе скорости распространения сигналов [Гомера, Потапов, 2014].

Обработка сигналов АЭ всегда была ключевой проблемой при оценке повреждений объекта [Zhao, Kang, Yao, 2018]. В настоящее время существует несколько широко используемых коммерческих программных комплексов для АЭК: DiSP, Samos (PAC), AMSY (Vallen Systeme), ALine32D (Интерюнис), Малахит (Диотон) и др. [Оглезнева, 2011]. Данные комплексы не содержат подробных инструкций и комментариев компетентного и опытного специалиста, позволяющих ими пользоваться даже малоподготовленному сотруднику завода, если он не имеет специального физического или математического образования. Стоит отметить, что алгоритмы локации во всех программных комплексах заранее жестко определены и не всегда допускают возможность изменить основной алгоритм расчета (который, как правило, скрыт от пользователя), а только настроить параметры этого расчета. В связи с этим всегда существует необходимость в универсальном методе, не требующем специальной подготовки от человека, который будет его использовать.

Целью работы является, во-первых, представление метода фильтрации, локации и определение скоростей для сигналов АЭ, во-вторых — апробация работы метода на примере калибровочных данных АЭ системы на реальном тонкостенном производственном объекте. Этот пример позволяет продемонстрировать дифференцированное определение скорости для каждого сигнала и фиксацию акустической волны Рэлея или Лэмба в зависимости от удаленности источника от ближайшего датчика — преобразователя акустической эмиссии (ПАЭ).

Определение местоположения источника АЭ в контролируемом объекте дает возможность в реальном масштабе времени или во время пост-анализа определить зону, в которой находится зарегистрированный источник АЭ, и сделать вывод о его возможном происхождении (результат развития дефекта, трения объекта на опорах, течь у штуцера, смещение конструктивных элементов и т. д.). В зависимости от количества ПАЭ, зарегистрировавших возникший акт АЭ в контролируемом материале, возрастает точность определения местоположения источника АЭ. С другой стороны, следует учитывать, что при распространении сигнала от источника до ПАЭ неизбежно возникают ошибки разницы времен прихода и, соответственно, ошибки определения координат источников АЭ. Причинами ошибок могут являться: несоответствие математической локационной модели объекта его реальной форме, сложные пути распространения сигналов по корпусу объекта, неодинаковая скорость звука в продольном и поперечном направлении проката металла корпуса объекта, наличие сварных соединений, штуцеров и других элементов объекта на путях распространения сигналов и т. п.

Скорость распространения звука в объекте контроля и ее адекватное определение в локационной схеме также имеют важнейшее значение для точности локации источника АЭ [Комаров, 2021]. Наиболее распространенным способом определения скорости распространения АЭ сигналов в материале является экспериментальный, в дальнейшем это значение скорости используется для назначения параметров процессора локализации в АЭ-системе [Standardization, 2022]. Но

при контроле тонкостенных объектов имеет место довольно сложная волновая картина. Скорость различных компонент находится в диапазоне от 0 до 520 см/мс. В массивных твердых средах при срабатывании источника АЭ возникают продольные и поперечные волны. Если источник находится близко к поверхности, также возникает волна, распространяющаяся вдоль поверхности, — рэлеевская волна. Все эти типы волн имеют разные скорости и время затухания. Таким образом, определение эффективной скорости звука при локации является важнейшим этапом подготовки испытания.

## Материалы и методы

Математическая постановка задачи определения на плоскости координат источника  $x$  и  $y$  (см) сводится к системе нелинейных алгебраических уравнений, описывающей распространение сигнала со скоростью  $v$  (см/мс) от источника до ПАЭ, зарегистрировавших этот сигнал, с известными разностями времен прихода  $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$  (мс):

$$\begin{cases} \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} = vt, \\ \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} = v(t + \Delta t_1), \\ \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} = v(t + \Delta t_2), \\ \sqrt{(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2} = v(t + \Delta t_3). \end{cases} \quad (1)$$

Данная система содержит четыре неизвестные величины:  $x, y, v, t$ . Поэтому для корректной работы метода подходят сигналы, которые зафиксировали минимум 4 ПАЭ. В левой части каждого уравнения — расстояние от искомой точки до датчика  $i$  с координатами  $(x_i, y_i)$ , а в правой части — произведение скорости  $v$  распространения сигнала и времени, за которое сигнал достиг  $i$ -го датчика. Для каждого рассматриваемого события датчики нумеруются от 1 до 4 в зависимости от порядка, в котором на них приходит сигнал от источника. Таким образом, для первого датчика время, за которое сигнал от источника достиг его, будет  $t$ , для второго —  $(t + \Delta t_1)$ , для третьего —  $(t + \Delta t_2)$ , для четвертого —  $(t + \Delta t_3)$ . Выбор принятых обозначений обусловлен форматом исходных данных. Также при постановке задачи было принято необходимое допущение, что сигнал распространяется равномерно и прямолинейно.

Для решения системы уравнений (1) используется комплекс численных методов: в качестве метода линеаризации — метод Ньютона–Канторовича, подразумеваются метод Ньютона–Рафсона, обобщенный Л. В. Канторовичем на функциональные нормированные пространства [Канторович, 1948], и общий итерационный процесс.

Поставим в соответствие системе (1) нелинейное операторное уравнение  $T(\omega) = 0$ , где искомый вектор  $\omega = (x, y, v, t)^T$ . Предположим, что существует такой  $\omega^*$ , что  $T(\omega^*) = 0$ . Полагая, что оператор  $T(\omega)$  имеет непрерывную производную  $T'(\omega)$ , а также правый обратный оператор  $[T'(\omega)]^{-1}$ , для произвольного элемента  $\omega_0$  можно заменить элемент  $T(\omega_0) = T(\omega_0) + T(\omega^*)$  близким ему выражением  $T'(\omega_0)(\omega_0 - \omega^*)$ , и, следовательно, есть основания полагать, что решение линейного уравнения  $T'(\omega_0)(\omega_0 - \omega^*) = T(\omega_0)$  будет близко к  $\omega^*$ .

Таким образом, придем к последовательности  $\omega_n, n = 1, 2, \dots$  (член  $\omega_0$  — начальное приближение):

$$\omega_{n+1} = \omega_n - T'(\omega_n)^{-1}(T(\omega_n)), \quad n = 0, 1, \dots \quad (2)$$

Каждый член последовательности (2) является приближенным решением соответствующего нелинейного операторного уравнения  $T(\omega) = 0$ , а последовательность  $\omega_n, n = 1, 2, \dots$ , на каждом

шаге итерации  $n$  определяется как решение системы линейных алгебраических уравнений [Господариков, Максименко, 2013; Gospodarikov, Zatsepin, 2019].

Перепишем систему (1) в виде  $T(\omega) = 0$ :

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}-vt=0, \\ \sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}-v(t+\Delta t_1)=0, \\ \sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}-v(t+\Delta t_2)=0, \\ \sqrt{(x-x_4)^2+(y-y_4)^2}-v(t+\Delta t_3)=0. \end{cases} \quad (3)$$

Тогда матрица  $T'(\omega)$  — матрица Якоби от искомой вектор-функции:

$$\begin{bmatrix} \frac{x-x_1}{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}} & \frac{y-y_1}{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}} & -t & -v \\ \frac{x-x_2}{\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}} & \frac{y-y_2}{\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}} & -(t+\Delta t_1) & -v \\ \frac{x-x_3}{\sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}} & \frac{y-y_3}{\sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}} & -(t+\Delta t_2) & -v \\ \frac{x-x_4}{\sqrt{(x-x_4)^2+(y-y_4)^2}} & \frac{y-y_4}{\sqrt{(x-x_4)^2+(y-y_4)^2}} & -(t+\Delta t_3) & -v \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Обозначим  $(T')^{-1}$  матрицу, обратную к (4). Применяя метод линеаризации Ньютона–Канторовича к системе (1) и переходя к последовательности (2), получим формулы для вычисления каждого приближения в явном виде:

$$\begin{pmatrix} x_{n+1} \\ y_{n+1} \\ v_{n+1} \\ t_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ v_n \\ t_n \end{pmatrix} - (T'_n)^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \sqrt{(x_n-x_1)^2+(y_n-y_1)^2}-v_n t_n \\ \sqrt{(x_n-x_2)^2+(y_n-y_2)^2}-v_n(t_n+\Delta t_1) \\ \sqrt{(x_n-x_3)^2+(y_n-y_3)^2}-v_n(t_n+\Delta t_2) \\ \sqrt{(x_n-x_4)^2+(y_n-y_4)^2}-v_n(t_n+\Delta t_3) \end{pmatrix}, \quad n=0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

В качестве начального приближения  $\omega_0 = (x_0, y_0, v_0, t_0)^T$  будем использовать координаты точки  $(x_0, y_0)$  (см), равноудаленной от первых трех сработавших ПАЭ, в качестве начальной скорости  $v_0$  (см/мс) задаем несколько значений в диапазоне 50–500 см/мс с шагом 50, чтобы обеспечить быструю сходимость метода, а начальное время  $t_0$  (мс) рассчитывается в зависимости от координат и заданной скорости по формулам

$$x_0 = \frac{x_1+x_2+x_3}{3}, \quad y_0 = \frac{y_1+y_2+y_3}{3}, \quad t_0 = \frac{\sqrt{(x_0-x_1)^2+(y_0-y_1)^2}}{v_0}. \quad (6)$$

Для выполнения численных экспериментов метод линеаризации и итерационный процесс были записаны на языке MATLAB. Вычисления выполняются до достижения заданной точности: максимальная величина слагаемого  $T'(\omega_n)^{-1}(T(\omega_n))$  в уравнении (5), измеряемая с помощью нормы Чебышёва, не превосходит 0,01, что является допустимой точностью вычислений для практических целей.

## Результаты и обсуждение

### Описание эксперимента

Калибровка АЭ-системы является одним из важных этапов АЭК, для которой применяются имитаторы АЭ, например пьезопреобразователь, возбуждаемый электрическими импульсами от генератора, источник Су–Нильсена (Hsu–Nielsen source) или другой, соответствующий требованиям [Standardization, 2022; ГОСТ, 1999], с помощью которых при выполнении проверки точности локации производится «обстукивание» объекта контроля по определенным точкам. Ручная калибровка включает 1–5 изломов имитатора АЭ у каждого ПАЭ и в центре кластеров. Имитатор должен находиться на расстоянии 3–5 см от ПАЭ [Стандарт ASTM E1139/E1139M-2017].

В данной статье мы иллюстрируем работоспособность предложенного метода именно на эксперименте с калибровкой АЭ-системы, а не в ходе дефектоскопии, так как генерация сигнала в этом случае проводится вблизи ПАЭ и позволяет наблюдать сильное разделение скоростей сигналов в зависимости от типа зафиксированной волны, а в рабочем процессе нагружения и АЭК редко встречается ситуация, когда большое число источников АЭ настолько близко к ПАЭ, что возможно зафиксировать волну Лэмба, и они обычно теряются в общем массиве сигналов.

Как правило, при контроле тонкостенных объектов при дистанциях между ПАЭ и источником АЭ до  $R$  см эффективная скорость распространения близка к скорости наиболее быстрой волны Лэмба, т. е. к 520 см/мс. При дистанциях выше  $R$  см волна Лэмба, как правило, затухает, и эффективная скорость распространения становится ниже, то есть близкой к скорости волны Рэлея — 300 см/мс. С этой скоростью распространяется наибольшее число различных частотных составляющих [Викторов, 1966]. На практике  $R$  составляет около 50 см. В качестве объекта исследований выступает абсорбер очистки углекислого газа (материал — сталь 09Г2С, толщина стенки — 28 мм, вместимость аппарата — 35 м<sup>3</sup>, внутренний диаметр — 1600 мм, высота — 16 700 мм), для которого с помощью многоканальной АЭ-системы AMSY5 фирмы Vallen Systeme GmbH выводились данные о времени сработавших ПАЭ.

Обследование производилось на поверхности стенок сосуда, представляющего собой цилиндр, поэтому допустимо представлять объект в виде его развертки в плоскость, учитывая возможность перехода сигнала через границу воображаемого разреза.

Необходимые для работы метода исходные данные — координаты ПАЭ, возможный диапазон скоростей сигнала; для каждого сигнала — порядок и номера ПАЭ, которые зафиксировали данный сигнал и время фиксации на каждом из них сигнала относительно начала эксперимента. При этом до начала расчета проводится фильтрация исходных данных: отбрасываются сигналы, амплитуда которых ниже 40 дБ, и сигналы, которые могут быть вызваны электромагнитными волнами, в том числе широкими атмосферными ливнями [Bonvech et al., 2022].

Точность локации сигналов АЭ, полученной разработанным методом, оценивается путем вычисления показателя точности локации LUCY (Location UnCertaintY), используемого в системе Vallen-Systeme. Значение LUCY для данного сигнала АЭ тем меньше, чем ближе к реальной скорости распространения сигнала от источника до ПАЭ скорость, введенная в локационный алгоритм. На практике этот показатель можно также интерпретировать как радиус условной окружности, в области которой следует искать дефект при дополнительном контроле другими методами НК [Гомера, Потапов, 2014].

Рассмотрим множество из 48 сигналов, поступивших за время проведения калибровки АЭ-системы. В таблице 1 приведен пример исходных данных для сигналов, где каждому сигналу присвоены порядковый номер (первый столбец), номер ПАЭ в порядке их срабатывания для данного сигнала (столбцы 2–5), а также разница времен прихода (столбцы 6–8).

Таблица 1. Пример исходных данных для расчета

Сигнал	1-й ПАЭ	2-й ПАЭ	3-й ПАЭ	4-й ПАЭ	$\Delta t_1$ (мс)	$\Delta t_1$ (мс)	$\Delta t_1$ (мс)
N21	21	19	22	17	0,304	0,307	0,453
N22	21	22	19	17	0,225	0,242	0,302
N23	18	22	21	16	0,281	0,334	0,489
N24	18	22	21	16	0,431	0,433	0,441
N27	15	16	12	13	0,315	0,396	0,481
N29	12	13	15	16	0,355	0,395	0,443
N30	12	13	15	16	0,318	0,401	0,449
N35	10	14	31	9	0,270	0,316	0,409
N38	9	33	31	27	0,236	0,240	0,395

В таблице 2 приведены результаты численных экспериментов для сигналов из таблицы 1. В соответствующих столбцах указаны найденные координаты источника сигнала, скорость, расстояние  $R$  (см) от источника до 1-го ПАЭ, зафиксировавшего сигнал, количество итераций для достижения заданной точности и значение показателя LUCY.

Таблица 2. Результаты численных экспериментов для наиболее интересных сигналов

Сигнал	$x$ (см)	$y$ (см)	$v$ (см/мс)	$R$ (см)	Кол-во итер.	LUCY (см)
N21	7,34	478,03	293,04	24,12	3	0,01
N22	1,96	494,88	460,68	6,42	3	0,08
N23	-100,39	596,65	374,79	13,44	5	0,13
N24	—	—	—	—	Не сходится	—
N27	24,34	871,55	149,98	60,95	4	0,01
N29	-49,48	897,08	200,67	51,07	4	0,05
N30	-58,02	904,74	228,56	47,63	4	0,03
N34	-68,21	1113,09	409,66	7,93	4	0,02
N35	-79,98	1229,67	442,57	1,19	3	0,36
N38	-86,13	1415,40	445,68	3,51	4	0,01

Диапазон получившихся скоростей допустим для данного материала и условий калибровки. Количество итераций, необходимых для расчета данных по каждому сигналу, не превосходит 5, а общее время обработки всех сигналов на пользовательском ПК не превосходит 2 с. Для некоторых исходных данных метод не сошелся, отфильтровав таким образом недостоверные строки-сигналы (например, N24). Подобные сигналы появляются в результате разных причин: ошибка срабатывания ПАЭ; шумы; на пути распространения сигнала до ближайших ПАЭ встретились люк-лаз, трещина или другая часть конструкции, которая исказила сигнал; помехи электромагнитной природы, вызвавшие одновременное срабатывание нескольких ПАЭ; прохождение сигнала по воде, а не по поверхности сосуда и др. Такого рода помехи оказывают влияние на достоверность регистрируемых данных. На этапе численного решения уравнений метод отфильтровывает на калибровочных данных около 25 % исходных данных (12 из 48 сигналов), а на реальных экспериментах с нагрузкой на производственный объект — до 80 % (1500 из 1800 сигналов). В данной статье этот эксперимент не приводится.

На рис. 1 красными крестиками обозначены места установки ПАЭ и их номера, черными точками обозначена локация источников сигналов, которую рассчитал метод. Как можно видеть, большинство точек находится вблизи ПАЭ, что подтверждается методикой проведения калибровки. Нумерация на рис. 1 соответствует нумерации в обеих таблицах.

Локация источника АЭ с помощью комбинации методов линеаризации Ньютона–Канторовича и общего итерационного процесса выполняется без предварительного определе-

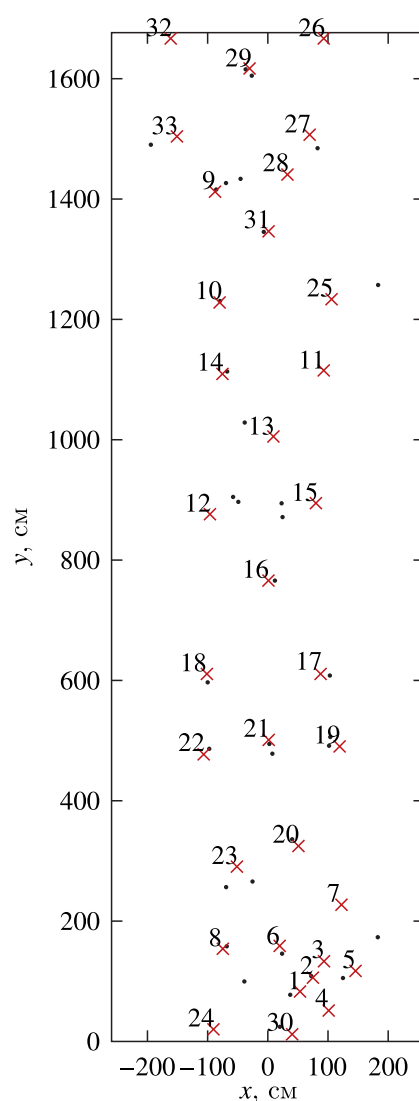


Рис. 1. Результаты локации на схеме объекта (крестики — положение ПАЭ с указанием номера, точки — найденные источники сигналов АЭ)

ния скорости распространения сигнала в данном объекте. В то время как в АЭ-системе AMSY5 (Vallen-Systeme), как и во многих других, необходимо заранее задать скорость распространения звука в материале, и она будет установлена одинаковой для всех импульсов на схеме локации [Комаров, 2021]. Если рассматривать скорость одинаковой для всех сигналов, не учитывая природы их возникновения и близости относительно ПАЭ, то искажается физическая картина эксперимента, что дает неточные результаты локации. Это утверждение имеет силу не только на этапе калибровки (подготовки эксперимента), но и в процессе постобработки реальных данных при нагружении объекта. Поэтому основным достоинством разработанного метода можно считать его способность вычислять локацию для разноскоростных сигналов в рамках одного эксперимента.

### ***Разделение волн АЭ на волны Рэлея и Лэмба***

Рассмотрим в таблице 2 распределение величин скоростей в зависимости от близости расположения источника сигнала от ПАЭ. Если источник находится близко (до 50 см) к первому сработавшему ПАЭ, то для него метод определяет высокую скорость, чаще всего более 400 см/мс,



а если в центре кластеров (дальше чем 50 см от всех ПАЭ) — то низкую, до 300 см/мс. Это связано с тем, что коэффициент затухания рэлеевских волн из-за поглощения и рассеяния в материале является линейной комбинацией соответствующих коэффициентов продольных и поперечных волн. Это явление можно ясно видеть при АЭК в массивном объекте из бетона [Balagurin, Makarikhin, Grigorieva, 2019]. Но рэлеевские волны распространяются не в толще материала, а по его поверхности, поэтому их амплитуда убывает с расстоянием  $R$  как  $\frac{1}{\sqrt{R}}$ , а не как  $\frac{1}{R}$ . Вследствие этого рэлеевские волны могут распространяться на существенно большие расстояния, чем продольные и поперечные волны [Викторов, 1966].

На рис. 2 для рассмотренных сигналов зафиксированы скорости распространения сигналов и расстояния от его источника до ближайшего ПАЭ. Обе величины позволил получить метод. Как видим, график четко отражает описанное выше физическое явление. А именно: у сигналов, близких к ПАЭ, скорость — 300–500 см/мс (что соответствует волнам Лэмба), а у удаленных — 140–250 см/мс (что соответствует волнам Рэлея).

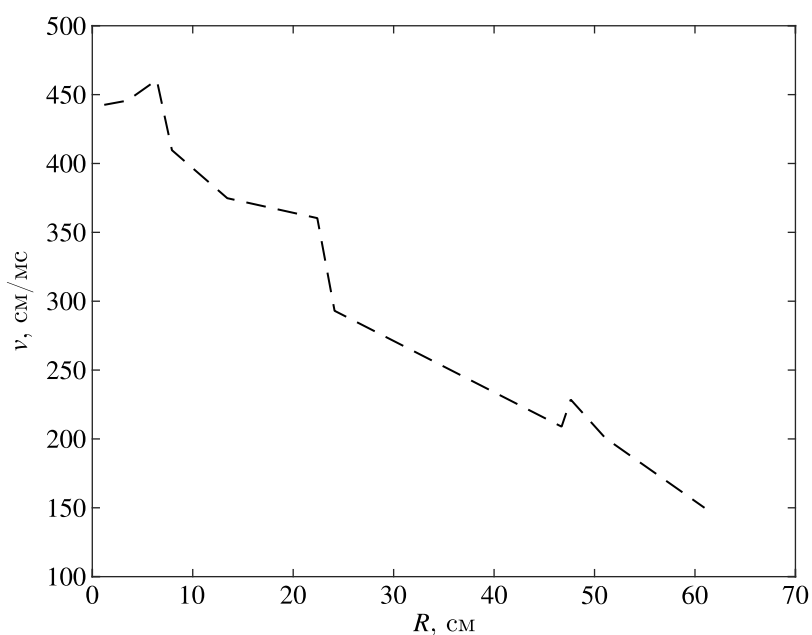


Рис. 2. Соответствие скорости сигнала  $v$  и расстояния  $R$  от источника до ближайшего ПАЭ

## Выводы

Разработанный авторами метод обработки данных АЭК для определения скорости и локации каждого сигнала с помощью комбинации численных методов — метода линеаризации Ньютона–Канторовича и общего итерационного процесса:

- 1) позволяет отфильтровать часть некорректных исходных данных;
- 2) вычисляет с заданной точностью координаты сигналов АЭ на планарной схеме объекта;
- 3) позволяет определить скорость каждого сигнала индивидуально и вывести на общую схему объекта все локации сигналов одновременно; для работы метода требуется, чтобы сигнал был зафиксирован хотя бы четырьмя ПАЭ;
- 4) позволяет наблюдать физическое явление разделения акустического сигнала на волны Лэмба и Рэлея, имеющие разные скорости затухания в тонкостенном листе металла.

Локация источников АЭ является неотъемлемой частью АЭК при нахождении местоположения дефектов на корпусах сепараторов, труб, сосудов высокого давления, кислотосодержащих емкостей и других производственных объектов. Многие из них относятся к категории опасных производственных объектов [Закон, 1997]. Несмотря на наличие множества экспериментальных данных и десятилетия использования АЭК, построение модели распределения АЭ-сигналов на схеме объекта затрудняется из-за невозможности эмпирического определения скоростей и координат каждого сигнала в отдельности в рамках одной модели. Представленный же в работе новый метод на основе численного решения системы специальных уравнений позволяет достоверно определить местоположение и скорость каждого сигнала АЭ, зарегистрированного хотя бы четырьмя ПАЭ, что подтверждается в эксперименте с калибровкой АЭ-системы и значениями показателя LUCY.

Анализ соответствия вычисленных скоростей сигналов АЭ и расстояния от них до ближайшего ПАЭ позволяет наблюдать физическое явление разделения акустического сигнала на волны Лэмба и Рэлея, имеющие разные скорости затухания в тонкостенном листе металла. С другой стороны, возможна ситуация, когда из четырех ПАЭ, использованных для вычислений, ближайшие ПАЭ зафиксировали волну Лэмба ( $v > 400$  см/мс), а остальные — волну Рэлея ( $v < 300$  см/мс). В этом случае предложенный метод либо не сойдется, либо покажет результаты, не учитывающие разделение на эти две моды волны.

В связи с указанными ограничениями метода можно обозначить следующую перспективу его развития: изучение целесообразности задания двух и более различных скоростей для каждого сигнала АЭ, поскольку в этом случае потребуются данные для составления системы из пяти и более уравнений, то есть некоторая часть сигналов, зафиксированных только четырьмя ПАЭ, будет исключена из рассмотрения. Но таким образом может быть учтена анизотропия скорости распространения сигнала и уменьшены связанные с этим погрешности локации.

Вторым перспективным направлением применения метода является кластеризация найденных с его помощью сигналов АЭ для объединения в области на схеме корпуса объекта, рекомендуемые для последующего дополнительного контроля (ультразвукового и рентгеновского). Решение задачи определения оптимальных параметров сигналов АЭ, при которых они могут быть объединены в кластер, позволит уменьшить площадь и количество этих областей и тем самым снизить временные и финансовые затраты на дополнительное обследование столь крупных объектов.

## Список литературы (References)

- Викторов И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. — М.: Наука, 1966. — 169 с.  
*Viktorov I. A. Fizicheskie osnovy primeneniya ul'trazvukovyh voln Releya i Lemba v tekhnike* [Physical bases of application of Rayleigh and Lamb ultrasonic waves in engineering]. — Moscow: Nauka, 1966. — 169 p. (in Russian).
- Гомера В. П., Потанов А. И. Оценка соответствия данных АЭ-контроля днищ РВС результатам их внутреннего обследования // В мире неразрушающего контроля. — 2014. — № 3. — С. 14–19.  
*Gomera V. P., Potanov A. I. Ocenka sootvetstviya dannyh AE-kontrolya dnishch RVS rezul'tatam ih vnutrennego obsledovaniya* [Assessment of compliance of the AE control data of the bottoms of steel vertical tanks with the result of their internal inspection] // *V mire nerazrushayushchego kontrolya*. — 2014. — No. 3. — P. 14–19 (in Russian).
- Господариков А. П., Максименко М. В. Об одном подходе к исследованию напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом нелинейного характера процесса их деформирования // Записки Горного института. — 2013. — Т. 205. — С. 60–63.  
*Gospodarikov A. P., Maksimenko M. V. Ob odnom podhode k issledovaniyu napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornyh porod s uchetom nelinejnogo haraktera processa ih deformirovaniya* [On one approach to the study of the stress-strain state of a rock massive, taking into account the nonlinear nature of the process of their deformation] // *Journal of Mining Institute*. — 2013. — Vol. 205. — P. 60–63 (in Russian).

- ГОСТ РД 03-300-99. Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов. — [Электронный ресурс]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200026166> (дата обращения: 17.03.2022).  
GOST RD 03-300-99. Trebovaniya k preobrazovatelyam akusticheskoy emissii, primenyaemym dlya kontrolya opasnykh proizvodstvennykh ob'ektov [Requirements for acoustic emission converters used for monitoring hazardous production facilities]. — [Electronic resource]. — Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200026166> (accessed: 17.03.2022).
- Канторович Л. В.* О методе Ньютона для функциональных уравнений // Доклады АН СССР. — 1948. — № 59 (7). — С. 1237–1240.  
*Kantorovich L. V.* O metode N'yutona dlya funktsional'nykh uravnenij [About Newton's method for functional equations] // Doklady AN SSSR. — 1948. — No. 59 (7). — P. 1237–1240 (in Russian).
- Комаров А. Г.* А-Line. Выполнение акустико-эмиссионного контроля. Практическое руководство // Всероссийская конференция с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (АПМАЭ-2021), 13–16 апреля 2021, Санкт-Петербург: сборник материалов. — СПб.: Свен, 2021. — С. 132–133.  
*Komarov A. G.* A-Line. Vypolnenie akustiko-emissionnogo kontrolya. Prakticheskoe rukovodstvo [A-Line. Performing acoustic emission control. Practical guide] // Vserossiyskaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem «Aktual'nye problemy metoda akusticheskoy emissii» (APMAE-2021), 13–16 aprelya 2021, Sankt-Peterburg: sbornik materialov [All-Russian conference with international participation «Actual problems acoustic emission method» (APMAE-2021), 13–16th of April 2021, Saint Petersburg: conference proceedings]. — Saint Petersburg: Sven, 2021. — P. 132–133 (in Russian).
- Оглезнева Л. А.* Сравнительные характеристики акустико-эмиссионных систем // Вестник науки Сибири. — 2011. — № 1. — С. 211–219.  
*Oglezneva L. A.* Sravnitel'nye harakteristiki akustiko-emissionnykh sistem [Comparative characteristics of acoustic emission systems] // Vestnik nauki Sibiri. — 2011. — No. 1. — P. 211–219 (in Russian).
- Растегаев И. А., Гомера В. П., Тюпин С. А., Смирнов А. Г., Григорьева А. В.* Оценка вероятности обнаружения расслоения стенки оборудования в зависимости от набора методов неразрушающего контроля и пути ее повышения // Дефектоскопия. — 2018. — № 9. — С. 3–13. — DOI: 10.1134/S1061830918090061  
*Rastegaev I. A., Gomera V. P., Tyupin S. A., Smirnov A. G., Grigorieva A. V.* Ocenka veroyatnosti obnaruzheniya rassloeniya stenki oborudovaniya v zavisimosti ot nabora metodov nerazrushayushchego kontrolya i puti ee povysheniya [Estimation of the probability of detecting equipment wall delamination depending on a set of non-destructive testing methods and ways to increase it] // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2018. — No. 9. — P. 3–13. — DOI: 10.1134/S1061830918090061 (in Russian).
- Утвержденный технологический процесс для непрерывного мониторинга акустической эмиссии металлических границ давления: международный (зарубежный) стандарт ASTM E1139/E1139M-2017: введен 01.06.2017 // ASTM International. — 7 с. — DOI: 10.1520/E1139\_E1139M-17  
Standard Practice for Continuous Monitoring of Acoustic Emission from Metal Pressure Boundaries: international (foreign) standard ASTM E1139/E1139M-2017: introduced 01.06.2017 // ASTM International. — 7 p. — DOI: 10.1520/E1139\_E1139M-17
- Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» // Российская газета. — 30.07.97. — № 145.  
Federal'nyj zakon ot 21.07.1997 No. 116-FZ «O promyshlennoj bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob'ektov» [Federal Law No. 116-FZ of 21.07.1997 «On Industrial Safety of Hazardous Production Facilities»] // Rossiyskaya Gazeta. — 30.07.97. — No. 145.
- Balagurin P., Makarikhin P., Grigorieva A.* Assessment of the integrity of the object based on the correlation of super-signals // International Conference on Innovations Induced by Research in Technical Systems. — Springer, Cham. — 2019. — P. 73–80. — DOI: 10.1007/978-3-030-37566-9\_7
- Bonvech E. A., Chernov D. V., Finger M., Galkin V., Podgrudkov D., Roganova T., Vaiman I.* EAS observation conditions in the SPHERE-2 balloon experiment // Universe. — 2022. — Vol. 8, No. 1. — P. 46–66. — DOI: 10.3390/universe8010046
- Gomera V. P., Grigorieva A. V.* Testing pressure vessels operating in the HF acid environment by acoustic emission method // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1636, No. 1. — P. 012007. — DOI: 10.1088/1742-6596/1636/1/012007
- Gospodarikov A. P., Zatsepin M. A.* Mathematical modeling of boundary problems in geomechanics // Gornyi zhurnal. — 2019. — No. 12. — P. 16–20. — DOI: 10.17580/gzh.2019.12.03

- Ono K.* Review on structural health evaluation with acoustic emission // *Applied Sciences*. — 2018. — Vol. 8, No. 6. — P. 958. — DOI: 10.3390/app8060958
- Standardization of AE in Europe within CEN TC138. — [Electronic resource]. — Available at: [http://www.ewgae.eu/aboe\\_new.html](http://www.ewgae.eu/aboe_new.html) (accessed: 17.03.2022).
- Zhao L., Kang L., Yao S.* Research and application of acoustic emission signal processing technology // *Ieee Access*. — 2018. — Vol. 7. — P. 984–993. — DOI: 10.1109/access.2018.2886095