

УДК 620.179.1
DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-5-11
EDN: SXVIES

А. А. КУЗНЕЦОВ
В. П. КУЛАКОВСКАЯ

Омский государственный
университет путей сообщения,
г. Омск

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ И КООРДИНАТ ДЕФЕКТА СИГНАЛА АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ

В статье приведены данные исследования сигналов акустической эмиссии при контроле дефектов поверхности герметичных резервуаров. В ходе проведенных исследований с изменением давления получены данные по изменению параметров сигналов, фиксируемых цифровой акустико-эмиссионной системой контроля СЦАД-16. На основании полученных результатов предложена методика для определения координат дефектов резервуаров с использованием цилиндрической системы координат. Предложенный в статье подход позволяет снизить погрешность определения координат дефектов по сравнению с выражениями в случае прямолинейного распространения волн на плоской поверхности.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, контроль дефектов, активность сигналов, железнодорожная цистерна, неразрушающий контроль, координаты дефектов.

В работе приводится исследование сигналов акустической эмиссии при контроле дефектов поверхности герметичных резервуаров. В работах [1–5] показаны преимущества акустико-эмиссионных методов контроля дефектов металлоконструкций. Для возбуждения сигналов акустической эмиссии необходимо подобрать оптимальное устройство нагружения. Для нагружения резервуаров в работе использовалось избыточное давление, создаваемое компрессором [6–7].

В качестве объекта контроля использовался запасный резервуар грузового вагона Р7-78 (рис. 1). До начала и в процессе проведения эксперимента резервуар находился в горизонтальном положении. Штуцер днища был герметично закрыт, а к штуцеру обечайки был подведен шланг для нагнетания воздуха при помощи компрессора [8].

В зоне штуцера днища присутствуют два дефекта типа трещина, образовавшихся вследствие механических воздействий (ударов) в процессе эксплуатации резервуара (рис. 1). Длина трещин составляет 3 и 7 мм, а ширина раскрытия — не более 0,1 мм.

В рамках проведения эксперимента собрана схема пневматического нагружения (рис. 2). Проведение опыта основывалось на алгоритме:

1. Составление схемы испытания.
2. Установка преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ).
3. Нагнетание воздуха через штуцер обечайки при помощи компрессора до появления первого акустического сигнала, включив при этом секундомер.
4. Фиксация времени и величины давления при появлении первого акустического сигнала.

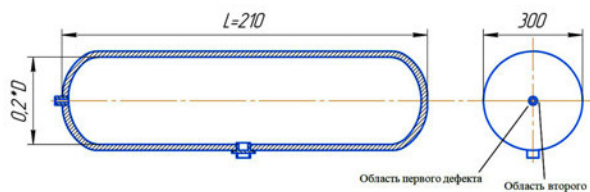


Рис. 1. Объект контроля (запасный резервуар): L — длина; D — наружный диаметр; $0,2 \cdot D$ — внутренний диаметр

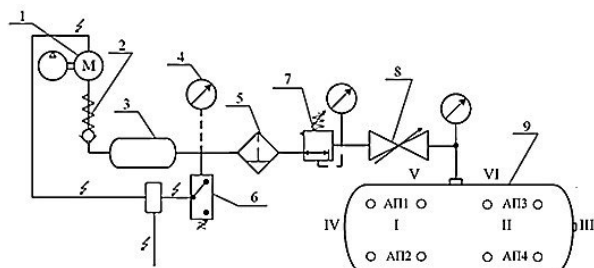


Рис. 2. Схема проведения испытания:

- 1 — вакуумный компрессор; 2 — обратный клапан;
3 — ресивер; 4 — манометр; 5 — фильтр со сбросом конденсата; 6 — реле вакуума; 7 — регулятор давления;
8 — клапан регулирующий; 9 — резервуар

Таблица 1

Результат опыта

Давление, P , атм	Время регистрации сигнала, t , сек
0	0
0,5	45
1,0	53
1,5	66
2,0	77
2,0	100

5. Постепенное увеличение давления воздуха в резервуаре, при этом каждые 0,5 атм должны повторяться операции из п. 4.

В ходе эксперимента проведено четыре статических нагружения. Максимальное создаваемое давление составило 2 атм. Прием, регистрация и оценка параметров сигналов АЭ осуществлялись при помощи акустико-эмиссионной системы типа СЦАД-16. При различных давлениях нагружающего компрессора регистрировалось различное количество сигналов. Оцифровка акустических сигналов производилась с частотой дискретизации 1 МГц.

Нагружение сосуда выполнялось поэтапно, величина нагрузки изменялась от 0,5 до 2 атм в течение 100 секунд. Результаты опыта занесены в табл. 1.

График изменения сигналов за время эксперимента, равного 100 с., представлен на рис. 3. За время эксперимента было зарегистрировано 1280 сигналов акустической эмиссии.

График изменения давления, представленный на рис. 3 (качественно совпадает с изменением количества сигналов во времени), имеет явно выраженные переходные процессы, при которых идет нагнетание давления, и участки, при которых давление поддерживается постоянным. Во время прове-

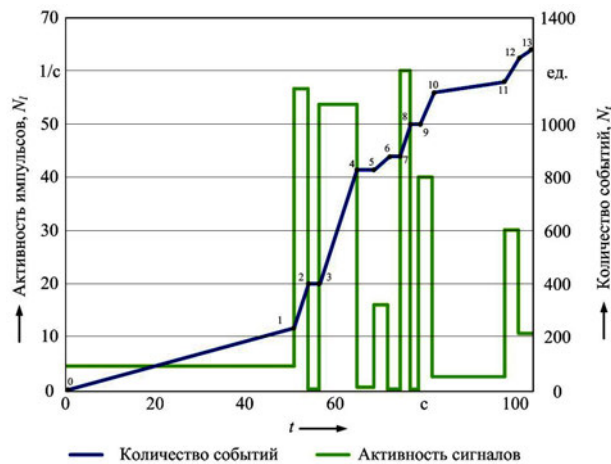


Рис. 3. График проведения испытания

дения экспериментальных исследований давление изменялось с 0 до 2 атм. Изменение проводилось ступенчато, время выдержки и увеличения давления представлено на графике (рис. 3).

Во время процесса изменения давления в цистерне на графике видно значительное увеличение количества сигналов, получаемых с датчиков АЭ, в то время как при выдержке давления и сохранения его на одном уровне количество сигналов снижается. Для определения активности сигналов использовано выражение:

$$N = \frac{t_k - t_n}{N_i}, \quad (1)$$

где t_k, t_n — время начала и конца этапа;
 N_i — количество сигналов.

На представленном графике весь процесс экспериментальных исследований разбит на несколько этапов, границы которых обозначены численными значениями от 0 до 13. За 0 принято время прихода первого сигнала после начала изменения давления.

В начальный момент времени от точки 0 до 1 производилось изменение давление внутри тела цилиндра от 0 до 0,5 атм. В этот период времени наблюдалось незначительное увеличение активности сигналов, что может быть связано с длительностью процедуры изменения давления.

В период от точки 1 до точки 2 наблюдается резкое возрастание активности сигналов, что связано со стабилизацией давления и дальнейшим его увеличением до значения в 1,0 атм.

Изменение давления производилось плавно с небольшой выдержкой на каждом интервале. Интервалам стабилизации давления в объеме цилиндра соответствуют горизонтальные участки, показанные на графике (участки 2-3, 4-5, 6-7, 8-9). На каждом из данных этапов наблюдается снижение активности сигналов, в то время как при интенсивном увеличении давления (участки 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 9-10, 11-13) — активность сигналов достигает пиковых значений.

Из анализа графиков по полученным сигналам, получаемых с датчиков АЭ, видно, что ширина импульса будет соответствовать времени изменения давления в цилиндре, а активность импульсов будет увеличиваться по мере увеличения давления. Также во время повышения давления происходит увеличение амплитуды акустических сигналов, в то

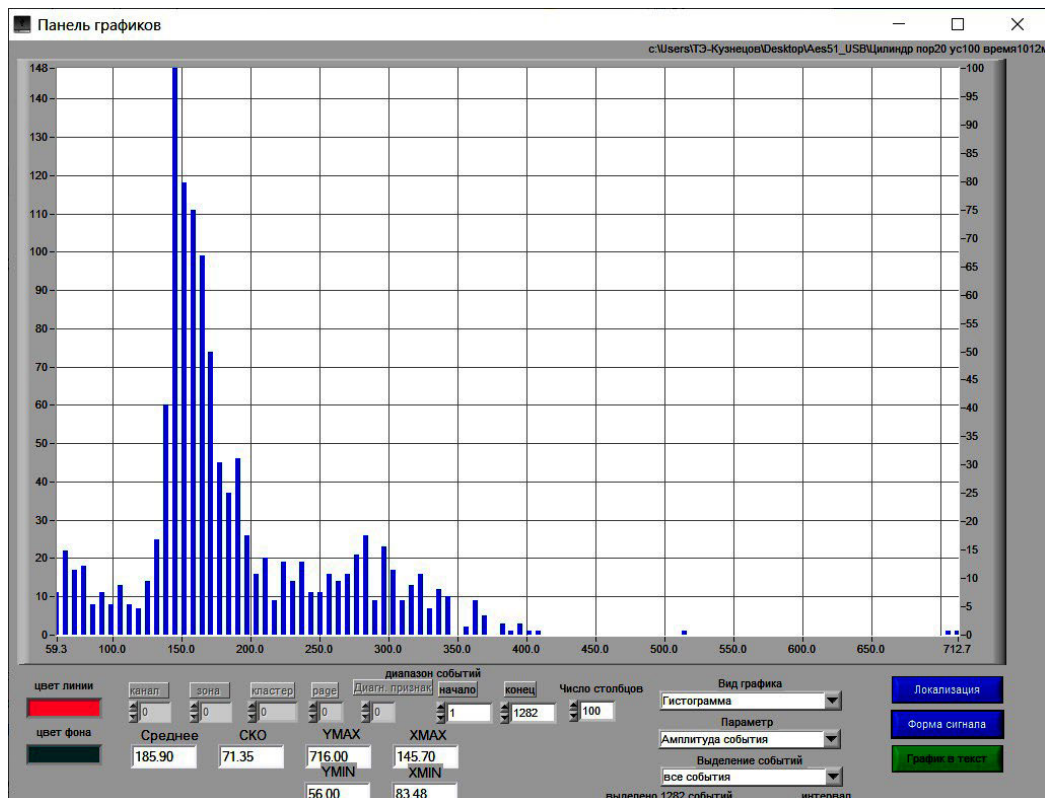


Рис. 4. Гистограмма амплитуд зарегистрированных сигналов

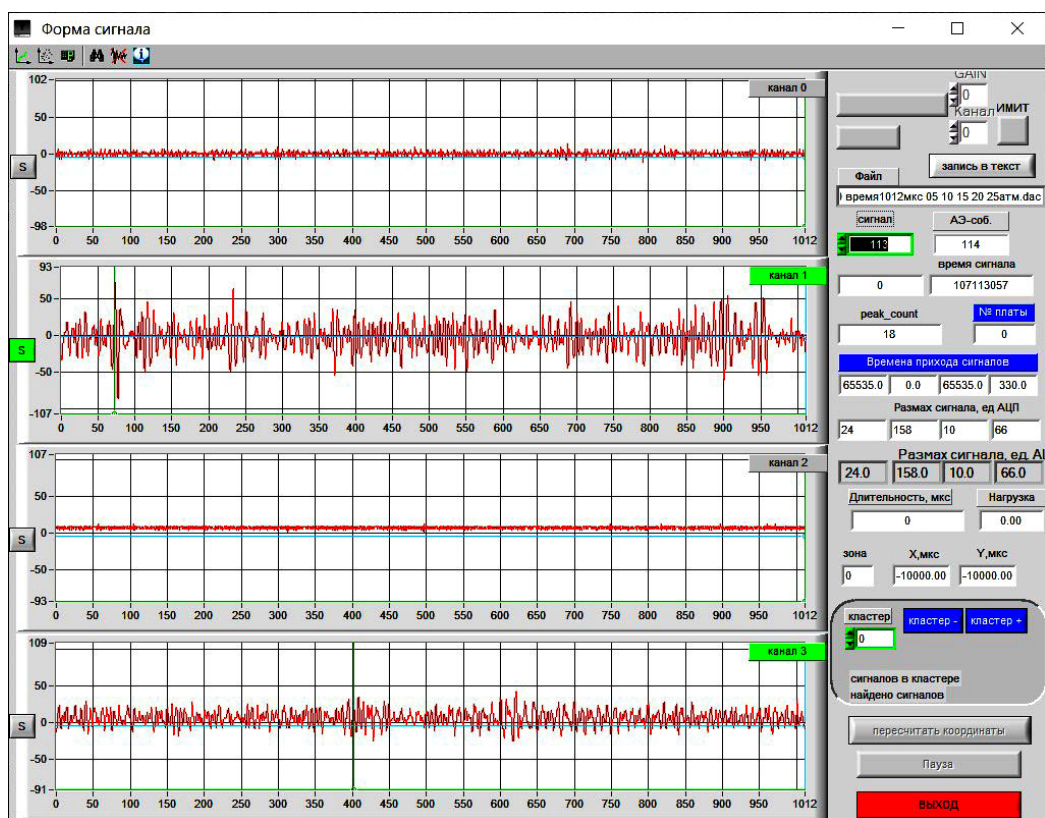


Рис. 5. Окно регистратора на 27-й секунде испытания

время как при постоянном давлении число сигналов и их амплитуда снижаются практически в два-три раза.

На рис. 4 представлена гистограмма распределения амплитуд зарегистрированных сигналов при

испытании цилиндра давлением от 0 до 2,0 атм. По горизонтальной оси отложены амплитуды сигналов (двойной размах), а по вертикальной оси — количество зарегистрированных импульсов. Окна программы приведены при работе программного

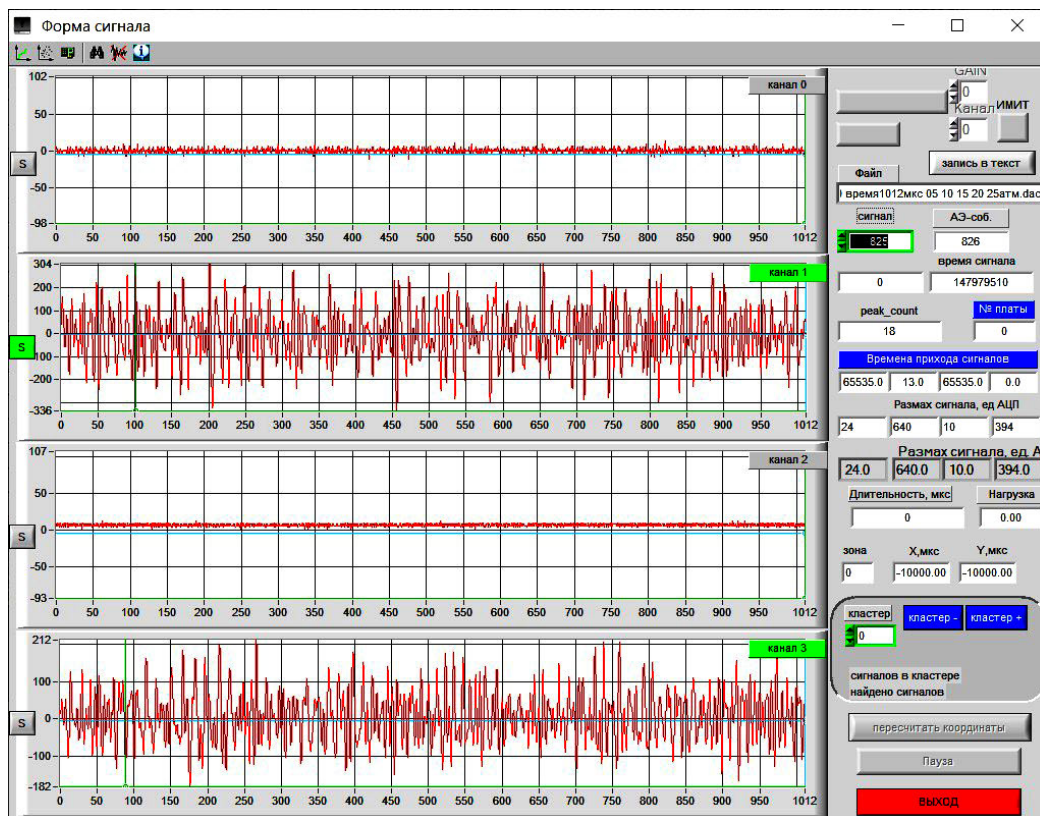


Рис. 6. Окно регистратора на 62-й секунде испытания

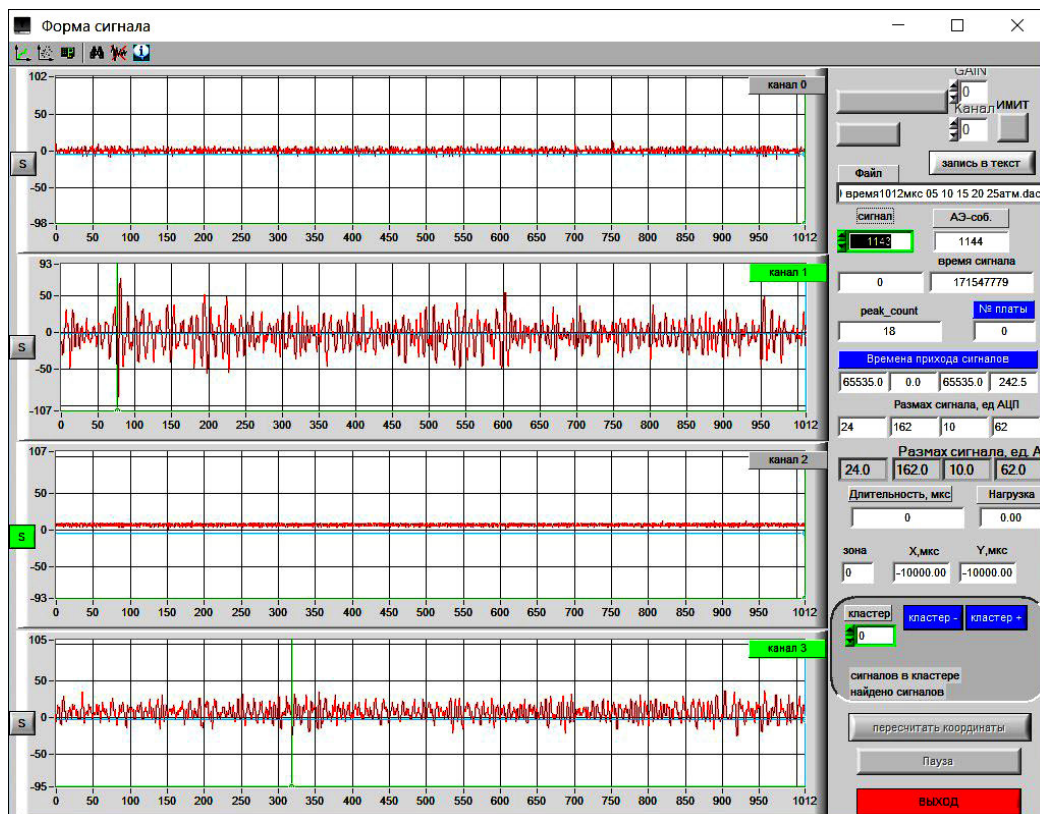


Рис. 7. Окно регистратора на 87-й секунде испытания

обеспечения системы СЦАД-16 с программным обеспечением AES-51.

Окна сигналов в различные интервалы времени с зарегистрированными сигналами показаны на рис. 5–7.

Результующие значения зарегистрированных сигналов представлены в сводной табл. 2. Из данных табл. 2 можно видеть, что максимальная амплитуда сигнала наблюдалась в точке 5 (рис. 3) при текущем давлении, равном 1,5 атм. Далее амплитуда

Таблица 2

Изменение давления и число зарегистрированных сигналов

Номер точки	Время, с	Давление в начале, атм	Число импульсов	Размах, АЦП
0	0	0,0	0	—
1	45	0,5	220	165
2	50		400	208
3	53	1,0	400	135
4	60		810	234
5	64		810	503
6	66	1,5	830	—
7	70		830	258
8	73		1000	—
9	75		1000	—
10	77	2,0	1120	—
11	95		1150	173
12	97		1250	—
13	100		1280	—

импульсов уменьшается, несмотря на увеличение давления. Это можно объяснить совпадением собственных колебаний берегов трещины при заданном размере дефекта [9–10].

Расчет координат дефектов основывался на определении разности времени прихода (РВП) сигналов АЭ на преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ). Акустические сигналы, генерируемые ПАЭ, пропорциональны расстоянию от места установки датчиков до трещины (L1-L4) и преобразуются пьезопластинами датчиков в электрические сигналы, которые затем усиливаются и оцифровываются в канале АЭ-системы.

Программное обеспечение установки СЦАД-16 позволяет получить данные по активности сигналов и их регистрацию. Примеры окон с сигналами показаны на рис. 5–7.

Расчет координат источника сигналов АЭ осуществляется по РВП на датчики пьезоантенны, а также с использованием вейвлет-анализа, модифицированного двухинтервального метода и метода кластеризаций. За время прихода сигнала АЭ принимается время срабатывания компаратора измерительного канала диагностической АЭ системы. При этом возникают погрешности ΔT в определении времени прихода, связанные с постоянством порогового уровня и невозможностью подстройки порога селекции при изменении шумов в процессе нагружения конструкции.

Расчет координат источника сигналов АЭ на плоскости производится по их РВП на пьезоантенну, представляющую фиксированный набор акустических датчиков. Для локализации источника сигнала АЭ используются времена прихода, рассчитываемые по оцифрованной форме, а координаты определяются из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} c^2 T^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2; \\ c^2 (T_c + T)^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2; \\ c^2 (T_c + T_2)^2 = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2, \end{cases} \quad (2)$$

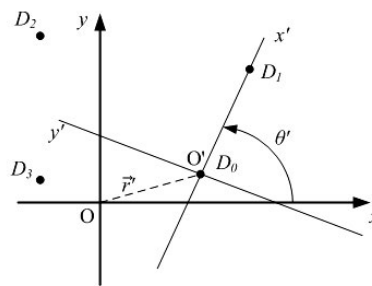


Рис. 8. Перенос системы координат для решения задачи локализации при произвольном расположении ПАЭ

где x, y — неизвестные координаты источника сигналов АЭ;

x_i, y_i — координаты ПАЭ;

T_c — неизвестное время распространения сигнала до момента его регистрации первым датчиком;

T_1, T_2 — времена прихода сигналов на два датчика пьезоантенны.

Для решения задачи локализации при произвольном расположении ПАЭ на плоскости используется перенос системы координат (рис. 8).

После преобразований системы уравнений (2) в координатах, приведенных к первому принявшему сигнал датчику, она принимает вид:

$$\begin{cases} c^2 T_c^2 = x^2 + y^2; \\ x = \frac{x_1^2 - c^2 T_1 (T_1 + 2T_c)}{2x_1}; \\ y = \frac{y_2^2 - c^2 T_2 (T_2 + 2T_c)}{2y_2} + \frac{x_2^2 - c^2 x_2 T_1 (T_1 + 2T_c)}{2x_1 y_2}; \\ x = ((x_{(D)} - x_{0(D)}) \cos \theta + (y_{(D)} - y_{0(D)}) \sin \theta; \\ y = -((x_{(D)} - x_{0(D)}) \sin \theta + (y_{(D)} - y_{0(D)}) \cos \theta, \end{cases} \quad (3)$$

где θ — угол поворота координатных осей;

$x_{(D)}, y_{(D)}$ — исходная ось декартовых координат.

Представленный подход позволяет локализовать координаты на плоскости, что при диагностике цилиндрических резервуаров дает погрешность и увеличивает время. Одним из способов для повышения точности диагностики является использование цилиндрической системы координат.

Цилиндрическая система координат представляет собой трёхмерную систему координат и является обобщением полярной системы координат, которая производится посредством добавления третьей координаты и задаёт смещение произвольной точки M вдоль оси Oz относительно координатной плоскости Oxy [10]. При этом положение точки M в цилиндрической системе координат определяется тройкой чисел ρ, ϕ и z :

ρ — расстояние от точки M до оси Oz ;

ϕ — угол, образованный проекцией радиус-вектора точки M на плоскость Oxy с положительным направлением оси Ox ;

z — проекция точки M на ось Oz .

В качестве примера на рис. 9 представлены положения четырех характерных точек M_1, \dots, M_4 , в которых устанавливаются четыре акустических преобразователя с координатами $z_1, \phi_1, \dots, z_4, \phi_4$, при этом координаты $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho_4 = r$.

Поскольку аппликата z точки M в прямоугольной системе координат и аппликата z в цилиндрической

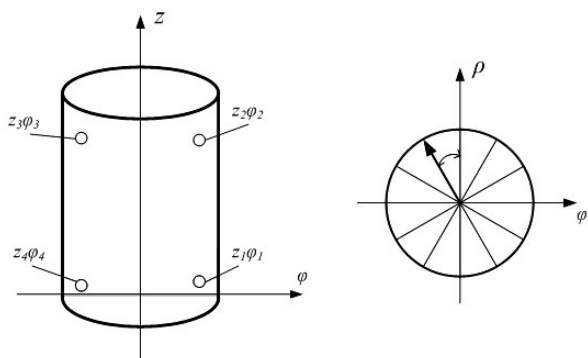


Рис. 9. Цилиндрическая система координат

системе координат совпадают, то формулы, связывающие между собой прямоугольные координаты x, y, z точки M и ее цилиндрические координаты r, φ, z имеют вид:

$$\begin{cases} x = r \cdot \cos \varphi; \\ y = r \cdot \sin \varphi; \\ z = z. \end{cases} \quad (4)$$

Формулы перехода (4) позволяют найти прямоугольные координаты по известным цилиндрическим. В то время как обратный переход выполняется по формулам:

$$\begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2}; \\ \cos \varphi = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}; \\ \sin \varphi = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}; \\ z = z. \end{cases} \quad (5)$$

С учетом формул для перехода от декартовой системы координат в цилиндрическую система (3) может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} c^2 T_c^2 &= (r \cos \varphi)^2 + (r \sin \varphi)^2 = r^2; \\ x &= \frac{(r_1 \cos \varphi_1)^2 - c^2 T_1 (T_1 + 2T_c)}{2(r_1 \cdot \cos \varphi_1)}; \\ y &= \frac{(r_2 \sin \varphi_2)^2 - c^2 T_2 (T_2 + 2T_c)}{2(r_2 \sin \varphi_2)} + \frac{(r_2 \cos \varphi_2)^2 - (r_2 \cos \varphi_2)(r_1 \cos \varphi_1)^2 - c^2 (r_2 \cos \varphi_2) T_1 (T_1 + 2T_c)}{2(r_2 \sin \varphi_2)}; \\ z &= z. \end{aligned} \quad (6)$$

Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы для применения метода АЭ для локализации места расположения дефекта (трещины) в случае объекта контроля цилиндрической формы. Необходимым является определение закономерности изменения амплитуды сигнала при постепенном увеличении давления. Проведение дальнейших исследований предполагается провести по определению оптимальных значений давления и времени выдержки, необходимых для регистрации акустических сигналов и локализации места расположения дефекта на поверхности цилиндрической формы (цистерна, технологические цилиндрические емкости).

Полученные в работе выражения позволят уменьшить погрешности определения координат

дефектов по сравнению с выражениями в случае прямолинейного распространения волн на плоской поверхности.

Библиографический список

1. Гусев О. В. Акустическая эмиссия при деформации монокристаллов тугоплавких металлов. Москва: Наука, 1982. 108 с.
2. Мерсон Д. Л. Физическая природа акустической эмиссии при деформационных процессах в металлах и сплавах: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Барнаул, 2001. 327 с.
3. Sedlak P., Hirose Y., Khan S. A. [et al.]. New automatic localization technique of acoustic emission signals in thin metal plates // *Ultrasonics*. 2009. Vol. 49. P. 254–262. DOI: 10.1016/j.ultras.2008.09.005.
4. Муравьев В. В., Бобров А. Л., Бояркин Е. В. [и др.]. Исследование наплавленных поверхностей литых деталей тележек грузовых вагонов с использованием метода акустической эмиссии // *Вестник РГУПС*. 2008. № 3. С. 42–47.
5. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Ивлиев В. В. [и др.]. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций. Новосибирск: Наука, 2011. 272 с.
6. Martin G., Cacic J., Dimopoulos J. Acoustic Emission for Tank Bottom Monitoring // *Advanced Materials Research*. 2008. Vol. 41-42. P. 499–506. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.41-42.499.
7. Кутень М. М., Бобров А. Л. Исследование закономерностей акустической эмиссии при гидравлическом испытании сосудов давления // *Политранспортные системы: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. (12–13 ноября 2020 г.)*. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2020. 965 с.
8. Kuznetsov A. A., Kondratenko E. V., Kulakovskaya V. P. Complex method of railway tanks and reservoirs tightness control // *Journal of Physics: Conf. Series*. 2021. Vol. 1901. 012012. 7 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012012.
9. Calabrese L., Proverbio E. A Review on the Applications of Acoustic Emission Technique in the Study of Stress Corrosion Cracking // *Corrosion and Materials Degradation*. 2021. Vol. 2 (1). P. 1–30. DOI: 10.3390/cmd2010001.
10. Friedrich L., Colpo A., Maggi A. [et al.]. Damage process in glass fiber reinforced polymer specimens using acoustic emission technique with low frequency acquisition // *Composite Structures*. 2021. Vol. 256. 113105. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113105.

КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск.

SPIN-код: 5259-0531

AuthorID (РИНЦ): 358976

AuthorID (SCOPUS): 56824984500

ResearcherID: A-5017-2017

Адрес для переписки: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

КУЛАКОВСКАЯ Вера Палладиевна, аспирант кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, Омск.

Адрес для переписки: verakulakovckaya@gmail.com

Для цитирования

Кузнецов А. А., Кулаковская В. П. Определение количественных параметров и координат дефекта сигнала акустико-эмиссионного контроля цилиндрических резервуаров // *Омский научный вестник*. 2024. № 1 (189). С. 5–11. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-5-11.

Статья поступила в редакцию 05.09.2023 г.

© А. А. Кузнецов, В. П. Кулаковская

DEFINING QUANTITATIVE PARAMETERS AND COORDINATES OF THE DEFECT SIGNAL BY ACOUSTIC-EMISSION CONTROL OF CYLINDRICAL TANKS

In this article there is presented the data obtained by researching the acoustic emission signals when controlling the surface defects of sealed tanks. In the process of studies with pressure changes the data on changes in the parameters of the signals recorded by the digital acoustic-emission control system SCAD-16 have been obtained. On the basis of the obtained results the methodology for determining the coordinates of the defects of the tanks using the cylindrical coordinate system has been proposed. The approach proposed in the article makes it possible to reduce the error of determining the coordinates of defects, as compared to the expressions in the case of rectilinear wave propagation on a flat surface.

Keywords: acoustic emission, defect control, signal activity, railway tank, nondestructive testing, defect coordinates.

References

1. Gusev O. V. Akusticheskaya emissiya pri deformatsii monokristallov tugoplavkikh metallov [Acoustic emission during deformation of single crystals of refractory metals]. Moscow, 1982. 108 p. (In Russ.).
2. Merson D. L. Fizicheskaya priroda akusticheskoy emissii pri deformatsionnykh protsessakh v metallakh i splavakh [Physical nature of acoustic emission during deformation processes in metals and alloys]. Barnaul, 2001. 327 p. (In Russ.).
3. Sedlak P., Hirose Y., Khan S. A. [et al.]. New automatic localization technique of acoustic emission signals in thin metal plates // *Ultrasonics*. 2009. Vol. 49. P. 254–262. DOI: 10.1016/j.ultras.2008.09.005. (In Engl.).
4. Murav'yev V. V., Bobrov A. L., Boyarkin E. V. [et al.]. Issledovaniye naplavlennykh poverkhnostey litykh detaley telezhek gruzovykh vagonov s ispol'zovaniyem metoda akusticheskoy emissii [Research built-up surfaces of cast parts of freight car bogies with the use of acoustical emission method] // *Vestnik RGUPS. Vestnik RGUPS*. 2008. No. 3. P. 42–47. (In Russ.).
5. Ser'yeznov A. N., Stepanova L. N., Ivliyev V. V. [et al.]. Akustiko-emissionnyy kontrol' zheleznodorozhnykh konstruksiy [Acoustic emission control of railway structures]. Novosibirsk, 2011. 272 p. (In Russ.).
6. Martin G., Cacic J., Dimopoulos J. Acoustic Emission for Tank Bottom Monitoring // *Advanced Materials Research*. 2008. Vol. 41-42. P. 499–506. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.41-42.499. (In Engl.).
7. Kuten' M. M., Bobrov A. L. Issledovaniye zakonomernostey akusticheskoy emissii pri gidravlicheskom ispytanii sosudov davleniya [Study of patterns of acoustic effects under hydraulic pressure in vessels] // *Politransportnyye sistemy. Polytransport Systems*. Novosibirsk, 2020. 965 p. (In Russ.).
8. Kuznetsov A. A., Kondratenko E. V., Kulakovskaya V. P. Complex method of railway tanks and reservoirs tightness control // *Journal of Physics: Conf. Series*. 2021. Vol. 1901. 012012. 7 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012012. (In Engl.).
9. Calabrese L., Proverbio E. A Review on the Applications of Acoustic Emission Technique in the Study of Stress Corrosion Cracking // *Corrosion and Materials Degradation*. 2021. Vol. 2 (1). P. 1–30. DOI: 10.3390/cmd2010001. (In Engl.).
10. Friedrich L., Colpo A., Maggi A. [et al.]. Damage process in glass fiber reinforced polymer specimens using acoustic emission technique with low frequency acquisition // *Composite Structures*. 2021. Vol. 256. 113105. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113105. (In Engl.).

KUZNETSOV Andrey Albertovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk.
SPIN-code: 5259-0531
AuthorID (RSCI): 358976
AuthorID (SCOPUS): 56824984500
ResearcherID: A-5017-2017
Correspondence address: kuznetsovaa.omgups@gmail.com
KULAKOVSKAYA Vera Palladiyevna, Graduate Student of Theoretical Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.
Correspondence address: verakulakovckaya@gmail.com

For citations

Kuznetsov A. A., Kulakovskaya V. P. Defining quantitative parameters and coordinates of the defect signal by acoustic-emission control of cylindrical tanks // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 1 (189). P. 5–11. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-5-11.

Received September 05, 2023.

© A. A. Kuznetsov, V. P. Kulakovskaya