

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ПЛАНАРНОЙ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С ПОМОЩЬЮ ТРИАНГУЛЯЦИОННОГО АЛГОРИТМА INGLADA

© 2024 г. Ю.Г. Матвиенко¹, И.Е. Васильев¹, Т.Д. Баландин¹, Д.В. Чернов^{1,*}

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
Россия 101990 Москва, Малый Харитоньевский пер., 4
E-mail: *chernovdv@inbox.ru

Поступила в редакцию 09.08.2024; после доработки 07.10.2024
Принята к публикации 18.10.2024

Разработке методики повышения эффективности обнаружения источников акустической эмиссии (АЭ) при планарной локации с применением алгоритма Inglada посвящена эта работа. Рассмотрены основные факторы, влияющие на погрешность определения координат источников АЭ при планарной локации с применением стандартной методики. К ним относится пороговый способ определения момента регистрации сигнала преобразователями АЭ по превышению фронтом нарастающей волны напряжения порога дискриминации (u_{th}), уровень частоты дискретизации сигналов (f_d), влияние дисперсионных свойств среды на процесс затухания амплитуды импульсов и скорость их распространения. С целью уменьшения влияния перечисленных выше факторов на результаты координатной локации источников АЭ предложена новая методика, основанная на применении корреляционных зависимостей скорости распространения импульсов АЭ в зависимости от амплитуды регистрируемых сигналов и учета задержки момента регистрации импульсов ПАЭ при пороговом способе их фиксации. С целью реализации предложенной методики проведена серия предварительных испытаний, в ходе которых с помощью электронного имитатора выполнялась генерация импульсов АЭ с уровнем максимальной амплитуды $u_m = 45\text{—}90$ дБ. При этом положение источника излучения импульсов АЭ варьировали в диапазоне от 150 до 700 мм относительно приемных преобразователей антенной решетки. В результате применения разработанной методики вероятность обнаружения источников АЭ повысилась до $p = 0,71$, тогда как при стандартном подходе она не превышала $p = 0,36$.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, планарная локация, частота дискретизации, абсолютная погрешность, метод Inglada, регрессионная модель, статистический анализ.

FEATURES OF PLANAR LOCALIZATION OF ACOUSTIC EMISSION SOURCES VIA THE INGLADA'S TRIANGULATION ALGORITHM

© 2024 Y.G. Matvienko¹, I.E. Vasiliev¹, T.D. Balandin¹, D.V. Chernov^{1,*}

¹Blagonravov Institute of Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Russia 101990 Moscow, Malý Kharitonyevsky Lane, 4
E-mail: *chernovdv@inbox.ru

This paper presents a methodology for enhancing the efficiency of acoustic emission (AE) source detection during planar localization using the Inglada's algorithm. The study analyzes the main factors affecting the accuracy of AE source localization when using a standard planar localization approach. These factors include the threshold-based method of determining the signal registration time by AE sensors, which is based on detecting the moment when the rising wavefront voltage exceeds the discrimination threshold (u_{th}), the signal sampling frequency (f_d), and the influence of the medium's dispersion properties on the attenuation of signal amplitude and wave propagation speed. To reduce the impact of these factors on the localization accuracy of AE sources, a novel methodology is proposed based on the use of correlation dependencies of AE pulse propagation speed on the amplitude of the recorded signals, as well as on accounting for the delay in the registration time of AE pulses during threshold detection. A series of preliminary experiments was conducted to implement the proposed methodology, where AE pulses were generated using an electronic simulator with a maximum amplitude level of $u_m = 45\text{—}90$ dB. The position of the AE pulse source varied in the range of 150 to 700 mm relative to the receiving sensors of the antenna array. As a result of applying the developed methodology, the probability of AE source detection increased to $p = 0,71$, compared to $p = 0,36$ when using the standard approach.

Keywords: acoustic emission, planar localization, sampling frequency, absolute error, Inglada's algorithm, regression model, statistical analysis.

DOI: 10.31857/S0130308224120011

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время регистрация импульсов акустической эмиссии (АЭ) в основном осуществляется пороговым способом — фиксацией превышения установленного порога дискри-

минации (u_{th}) нарастающим фронтом сигнала АЭ [1]. Выбор порога дискриминации осуществляют по результатам предварительных испытаний, состоящих в определении амплитуды сигналов помех [2]. Стандартная методика не учитывает влияние дисперсионных свойств среды на скорость распространения импульсов АЭ, их форму и спектр, амплитудно-частотные характеристики приемных преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ), параметры измерительной аппаратуры. Влияние перечисленных выше факторов приводит к существенным погрешностям при определении момента регистрации сигнала и вычисления разности времен прихода (РВП) импульсов на ПАЭ антенной решетки [3]. Следует отметить, что модификации порогового алгоритма позволяют учесть погрешности измерения скорости распространения импульсов АЭ и времени их регистрации. Существующие подходы, например, приведенные в работе [4], позволяют снизить погрешность построения координатной локации источников АЭ и устранить шумовые источники акустических сигналов.

Построение планарной локации координат источников акустических сигналов осуществляют по значениям РВП (Δt_{1-2} , Δt_{2-3} , Δt_{1-3}) и скорости распространения импульсов АЭ (V_g) в материале контролируемого изделия. Процедура расчета параметра V_g регламентирована нормативным документом ПБ 03-593-03 «Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов». Стандартный алгоритм расчета скорости не учитывает влияние дисперсии на энергетические и временные характеристики импульсов АЭ в процессе их распространения [5, 6]. В процессе удаления от источника АЭ компактный импульс «расплывается», разделяясь на отдельные волновые пакеты, каждый из которых обладает собственными частотными характеристиками и скоростью распространения [7]. Влияние перечисленных выше факторов приводит к значительным погрешностям при определении координат источников АЭ, в особенности при их локации вблизи приемных преобразователей на расстоянии $\Delta L \leq 100$ мм [8].

Для повышения точности планарной локации источников АЭ используют различные методики, основанные на применении нейронных сетей [9, 10], статистического анализа [11, 12], а также использовании атласа значений РВП [13, 14]. Перечисленные выше подходы, как правило, требуют большого количества предварительных испытаний, необходимых для определения нелинейных изменений энергетических и частотно-временных параметров регистрируемых сигналов [15]. К тому же это требует больших затрат вычислительных ресурсов измерительной системы, что затрудняет обработку данных АЭ в режиме реального времени. Следовательно, для снижения погрешности координатной локации источников АЭ возникает потребность в разработке новой методики обработки данных АЭ, учитывающей влияние дисперсионных свойств среды, особенностей акустического тракта и характеристик используемой аппаратуры на энергетические и временные параметры регистрируемых импульсов.

Целью настоящей работы является модификация стандартного алгоритма построения планарной локации методом Inglada. Для достижения поставленной цели авторами разработан алгоритм уточнения скорости распространения и времени регистрации импульсов АЭ с использованием моделей множественной линейной регрессии. В результате применения регрессионных моделей определены наиболее информативные АЭ-параметры, значения которых могут быть использованы для снижения погрешности построения планарной локации с помощью триангуляционного алгоритма Inglada.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ПЛАНАРНОЙ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С ПОМОЩЬ ТРИАНГУЛЯЦИОННОГО АЛГОРИТМА INGLADA

Одним из наиболее распространенных методов построения планарной локации источников АЭ является триангуляционный алгоритм Inglada, основанный на расчете радиусов пересекающихся окружностей (R_1 , R_2 , R_3) [1, 16]. На рис. 1 приведена триангуляционная схема планарной локации источников АЭ. Ниже представлена система уравнений для расчета координаты источника по методу Inglada:

$$\begin{cases} (X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 = V_g^2 (t - t_1)^2 \\ (X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 = V_g^2 (t - t_2)^2, \\ (X - X_3)^2 + (Y - Y_3)^2 = V_g^2 (t - t_3)^2 \end{cases} \quad (1)$$

где $(X; Y)$ — координаты источника АЭ; $(X_i; Y_i)$ — координаты i -го ПАЭ; t_i — время регистрации импульса АЭ i -м ПАЭ.

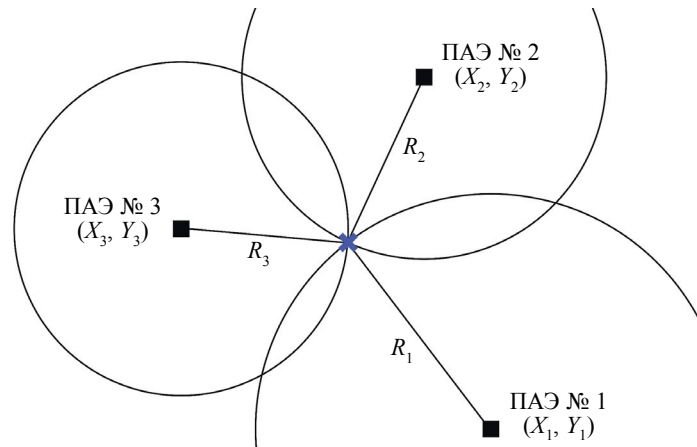


Рис. 1. Определение местоположения источника АЭ с помощью алгоритма Inglada: $R_i = V_g(t_i - t)$, где t_i — время регистрации импульса i -м ПАЭ; X_i, Y_i — координаты установки ПАЭ (■); X, Y — координаты источника АЭ (x).

В результате расчета координат источника АЭ с помощью триангуляционного алгоритма Inglada возникает два решения (X, Y, t) и (X', Y', t') , одно из которых физически нереализуемо, так как время регистрации импульса АЭ должно быть больше, чем найденное время излучения.

Оценка погрешности стандартного алгоритма планарной локации осуществлялась по результатам имитации импульсов АЭ амплитудой $u_m = 45\text{—}90$ дБ на поверхности алюминиевой пластины размером $990 \times 850 \times 7$ мм. В качестве источника импульсов АЭ различной амплитуды использовался преобразователь R15α-SMA фирмы «Mistras» (США), подключенный к генератору сигналов специальной формы GW Instek MFG-72120MA фирмы «Good Will Instrument Co.» (Тайвань). В результате проведения предварительных испытаний были определены оптимальные параметры измерительной аппаратуры: порог дискриминации $u_{th} = 42$ дБ, полоса пропускания цифровых фильтров $\Delta f_p = 100\text{—}300$ кГц, расчетная скорость распространения импульсов $V_g = 3300$ м/с, полученная при имитации сигналов АЭ на максимальном удалении ПАЭ ($B = 820$ мм) вне локационной зоны. Регистрация импульсов АЭ осуществлялась с помощью квазирезонансных преобразователей R15α-AST фирмы «Mistras» (США) с высокой чувствительностью в диапазоне частот $100\text{—}300$ кГц, подключенных к системе Aline-32D PCI компании «ИНТРЕЮНИС-ИТ» (Россия) с частотой дискретизации акустических сигналов $f_d = 1$ МГц. Использование приемных ПАЭ с максимальной чувствительностью в диапазоне частот менее 100 кГц приведет к регистрации большого числа отраженных импульсов АЭ и шумовых сигналов, оказывающих существенное влияние на точность построения координатной локации. Использование преобразователей с максимальной чувствительностью на частотах выше 300 кГц может привести к пропуску низкоамплитудных сигналов в связи с высоким уровнем затухания высокочастотных гармоник спектра импульсов АЭ [3]. Результаты построения планарной локации источников АЭ с помощью стандартного алгоритма представлены на рис. 2.

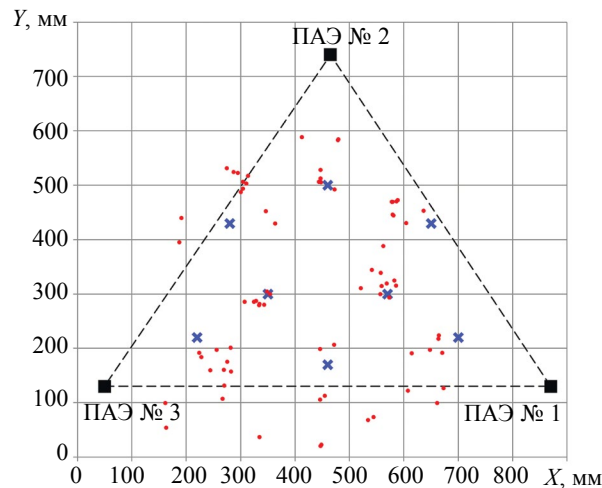


Рис. 2. Результаты построения планарной локации источников АЭ с помощью стандартного алгоритма Inglada.

Расчет погрешности построения планарной локации источников АЭ осуществлялся по результатам имитации акустических сигналов в координатах $(X; Y) = (220; 220), (280; 430), (460; 170), (350; 300), (460; 500), (700; 220), (570; 300), (650; 430)$ мм. Антенная решетка состояла из трех ПАЭ и представляла собой равнобедренный треугольник со сторонами $820 \times 732 \times 732$ мм. Минимальная погрешность координатной локации была зарегистрирована при имитации импульсов АЭ в координатах $(X; Y) = (350; 300), (460; 500)$ и $(570; 300)$ мм и составила $\Delta = \sqrt{(X - X')^2 + (Y - Y')^2} = 4,25$ мм, где $(X'; Y')$ — координаты индикаций АЭ-событий, $(X; Y)$ — координаты фактического местоположения источника акустических сигналов. При установке имитатора вблизи приемных преобразователей отмечается значительное отклонение индикации АЭ-событий от фактического местоположения источника акустических сигналов. Максимальная погрешность построения планарной локации с помощью алгоритма Inglada была зарегистрирована при имитации акустических сигналов в координатах $(X; Y) = (220; 220)$ мм и достигала $\Delta = 175,5$ мм.

Для снижения погрешности построения планарной локации источников АЭ авторами предложена методика, основанная на применении регрессионного анализа. Построение моделей множественной линейной регрессии позволяет определить корреляционные взаимосвязи между параметрами импульсов АЭ и погрешностью определения времени регистрации акустических сигналов преобразователями антенной решетки. Необходимо отметить, что построение регрессионных моделей осуществлялось по результатам предварительных испытаний, представленных на рис. 2. Апробация предложенного алгоритма осуществлялась по результатам экспериментальных исследований, состоящих в имитации импульсов АЭ в координатах $(X; Y) = (270; 140), (690; 140), (275; 230), (465; 260), (675; 255), (190; 310), (470; 335), (760; 305), (385; 405), (580; 405), (475; 535), (375; 595), (575; 590), (350; 300)$ мм.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Одним из основных факторов, влияющих на уровень погрешности координатной локации источников АЭ, является фиксация момента регистрации импульсов АЭ по превышению уровня порога дискриминации сигналов. В качестве примера на рис. 3 представлены формы импульсов, зарегистрированные при имитации акустических сигналов в координатах $(X; Y) = (225; 490)$ мм. Источник сигналов АЭ находился на удалении $R_i = 727, 255$ и 391 мм соответственно от ПАЭ № 1, № 2 и № 3. Как показано на рис. 3а, импульс АЭ, зарегистрированный ПАЭ № 2 на расстоянии 255 мм от источника акустических сигнал, имел наименьшее время нарастания.

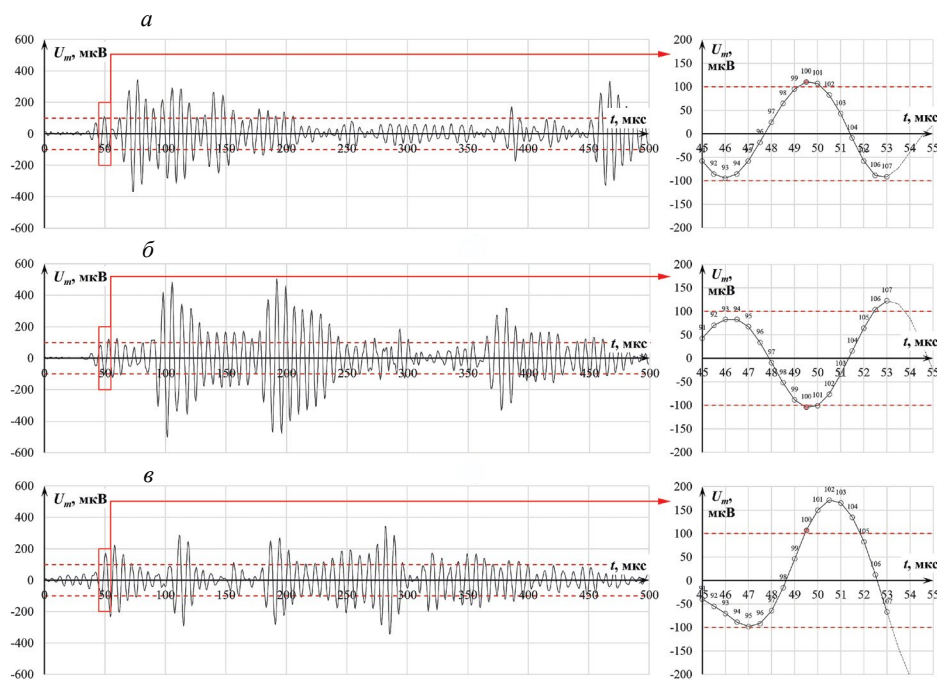


Рис. 3. Характерные формы импульсов АЭ, зарегистрированные с помощью ПАЭ № 2 (а); ПАЭ № 3 (б); ПАЭ № 1 (в). Координата имитации сигналов АЭ $(X; Y) = (225; 490)$ мм.

При увеличении расстояния между источником и приемными преобразователями передний фронт импульсов АЭ становится более пологим (рис. 3б и 3в) вследствие затухания высокочастотных мод. Как видно из рис. 3в, максимальная амплитуда фронта нарастающей волны не превышает напряжения порога дискриминации сигналов, что приводит к задержке его регистрации на $\Delta t_1 = 2,7$ мкс.

Задержка момента регистрации импульсов АЭ также зависит от частоты дискретизации измерительной аппаратуры. В результате аналого-цифрового преобразования дискретный импульс АЭ представляет собой набор отсчетов (дискретов). Фактическое время регистрации сигналов, определяемое по пересечению уровня порога дискриминации, не совпадает со временем регистрации отсчетов импульса АЭ (см. рис. 3а — отсчеты № 99 и 100). Так, при частоте дискретизации $f_d = 2$ МГц погрешность составляла $\Delta t_2 = 0,45$ мкс. Для повышения частоты дискретизации в режиме постобработки импульсов АЭ была использована методика передискретизации с использованием интерполяционного фильтра. Искусственное повышение частоты дискретизации до значений $f_d = 4, 5$ и 10 МГц привело к снижению задержки времени регистрации сигнала соответственно до $\Delta t_2 = 0,13, 0,07$ и $0,01$ мкс. Исходя из полученных результатов, оптимальным значением частоты дискретизации является $f_d = 4$ МГц, при которой задержка времени регистрации сигнала снижается в 3,46 раза ($0,45/0,13$) без значительного увеличения затрат вычислительных ресурсов. Для снижения погрешности планарной локации расчет задержек $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$ должен осуществляться с шагом $\Delta t \leq 1/f_d = 0,25$ мкс.

Другим фактором, снижающим погрешность координатной локации источников АЭ, является учет влияния амплитуды (u_m) регистрируемых импульсов на скорость (V_g) их распространения в объекте контроля. Для получения корреляционной зависимости $V_g = f(u_m)$ была решена обратная задача, состоящая в минимизации погрешности планарной локации путем итерационного изменения вычисляемой величины скорости V_g в диапазоне $1800\text{—}6000$ м/с по известным из предварительных испытаний значениям координат имитации X, Y и полученным временам прихода t_1, t_2 и t_3 . Результат построения корреляционной зависимости $V_g/c = f(u_m)$, нормированной относительно предельной скорости распространения сигналов АЭ в металлах $c = 6000$ м/с [1], представлен на рис. 4. Форма аппроксимирующей кривой, представленная штриховой линией, соответствует зависимости:

$$\frac{V_g}{c} = -0,15 \cdot \arctg(-0,3 \cdot u_m + 16,7) + 0,6. \quad (2)$$

Как показано на рис. 4, для импульсов АЭ с уровнем амплитуды $u_m \leq 55$ дБ нормированное значение скорости (V_g/c) не превышает 0,55. В диапазоне амплитуд $u_m = 55\text{—}65$ дБ отмечается рост значения V_g/c от 0,55 до 0,8. При амплитудах $u_m > 65$ дБ значение параметра V_g/c повышалось от 0,7 до 1,0.

Аппроксимация результатов экспериментальных исследований осуществлялась с помощью метода наименьших квадратов. Достоверность полученных результатов подтверждается значением коэффициента корреляции $R = 0,71$.

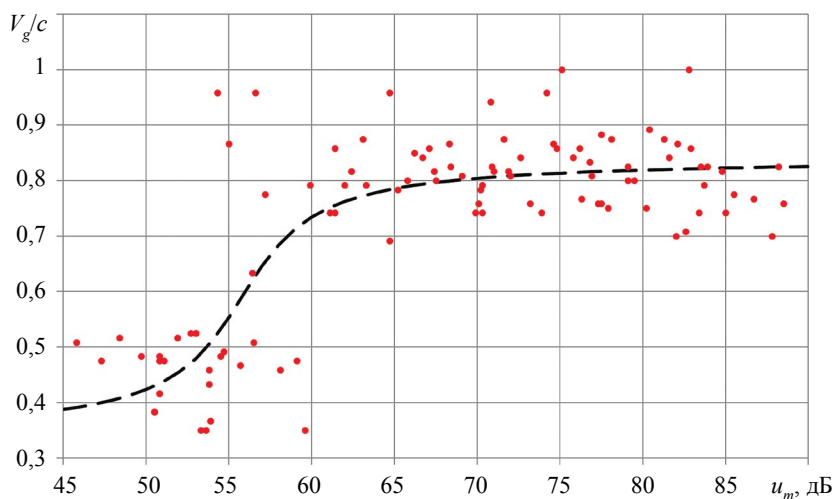


Рис. 4. Зависимость нормированной скорости (V_g/c) распространения импульсов АЭ от уровня их амплитуды (u_m).

Погрешность стандартного алгоритма локации зависит не только от точности определения времени регистрации импульс АЭ, но и от разности времени их прихода на преобразователи антенной решетки. Для оптимизации расчета было принято допущение, что погрешность регистрации импульсов ПАЭ № 1 соответствует $\Delta t_1 = 0$ мкс. Значения Δt_2 и Δt_3 рассчитывались путем минимизации погрешности координатной локации в процессе итерационного изменения времени задержки регистрации импульсов в диапазоне значений $\Delta t_{2,3} = [-100...100]$ мкс с шагом 0,25 мкс для известных координат источников ПАЭ (X ; Y). В результате статистического анализа экспериментальных данных был проведен расчет времени задержки регистрации импульсов (χ_2, χ_3) по значениям АЭ-параметров:

$$\begin{aligned}\chi_2 &= 0,11 \cdot (t_2 - t_1) - 0,41 \cdot u_{m_1} + 0,08 \cdot \frac{N_{n_1}}{t_{n_1}} - 0,07 \cdot u_{m_2} + 0,16 \cdot \frac{N_{n_2}}{t_{n_2}} + 2,68; \\ \chi_3 &= 0,02 \cdot (t_3 - t_1) - 0,03 \cdot u_{m_1} + 3,41 \cdot \frac{N_{n_1}}{t_{n_1}} - 0,04 \cdot u_{m_3} + 1,07 \cdot \frac{N_{n_3}}{t_{n_3}} + 17,62,\end{aligned}\quad (3)$$

где $u_{m_1}, u_{m_2}, u_{m_3}$ — амплитуда импульсов АЭ; N_{n_i}/t_{n_i} — усредненные значения выбросов; t_i — время регистрации импульсов i -м преобразователем.

Выбор наиболее информативных АЭ-параметров, коррелирующих с временем задержки регистрации импульсов АЭ, осуществлялся с помощью алгоритма пошагового добавления независимых переменных в модель множественной линейной регрессии. В результате обработки экспериментальных данных наибольшие значения статистики Фишера были зарегистрированы при добавлении в регрессионную модель параметров u_{m_i} , N_{n_i}/t_{n_i} и $(t_i - t_1)$.

В связи с нелинейными изменениями формы импульсов АЭ, возникающими в процессе распространения акустических сигналов от источника до наиболее удаленного преобразователя, применение разработанных моделей для прямого определения координат источника акустических сигналов не представляется возможным. В качестве примера на рис. 5 представлена зависимость погрешности регистрации импульсов ПАЭ № 2 (Δt_2) для известных координат источников АЭ-событий, представленных на рис. 2.

Как следует из рис. 5, задержка времени Δt_2 изменялась от -60 до 10 мкс независимо от местоположения источника АЭ. Аппроксимация результатов экспериментальных исследований осуществлялась с помощью дробно-рациональной функции (4). Достоверность результатов аппроксимации подтверждает уровень коэффициента корреляции $R = 0,76$:

$$\begin{aligned}\Delta t_2(\chi_2) &= \frac{1072 \cdot \chi_2 - 1345}{\chi_2^2 + 112,4 \cdot \chi_2 - 2650}; \\ \Delta t_3(\chi_3) &= \frac{23 \cdot \chi_3 - 21}{\chi_3^2 + 15 \cdot \chi_3 - 63}; \\ \begin{cases} t'_2 = t_2 + \Delta t_2(\chi_2) \\ t'_3 = t_3 + \Delta t_3(\chi_3) \end{cases}\end{aligned}\quad (4)$$

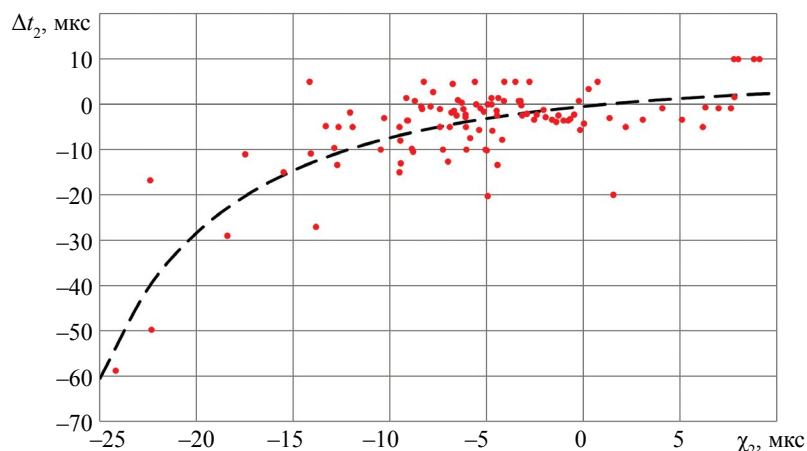


Рис. 5. Погрешность определения времени регистрации импульса АЭ.

где t'_2 и t'_3 — уточненные времена регистрации импульсов АЭ преобразователями № 2 и № 3.

Синтез корреляционных зависимостей (2)—(4) путем итерационной минимизации погрешности построения планарной локации обусловлен следующими особенностями. Как известно, для определения координат источников событий АЭ используют значения РВП (Δt_{1-2} , Δt_{2-3} , Δt_{1-3}) и скорости распространения импульсов АЭ (V_g) в материале контролируемого изделия. На начальном этапе применения разработанного алгоритма осуществляется построение функции $V_g = f(u_m)$ независимо от удаленности приемных преобразователей относительно источника акустических сигналов. Применение корреляционной зависимости $V_g = f(u_m)$ без учета времени задержки регистрации импульсов АЭ (χ_2 , χ_3) не позволяет снизить погрешность построения планарной локации до значений $\Delta \leq 0,1 \cdot B = 0,1 \cdot 820 = 82$ мм. Для снижения погрешности может быть решена обратная задача, состоящая в однозначном определении РВП (Δt_{1-2} , Δt_{2-3} , Δt_{1-3}) по известным значениям скорости V_g и координат имитации X и Y . Недостатком такого подхода является невозможность определения корреляционных зависимостей между решениями системы уравнений (1) и параметрами регистрируемых импульсов АЭ. Таким образом, для оптимизации вычислительных ресурсов и снижения погрешности построения планарной локации авторами предложено использовать корреляционные зависимости между погрешностью определения времени регистрации импульсов АЭ (Δt_2 , Δt_3) и параметрами (χ_2 , χ_3) с учетом допущения $\Delta t_1 = 0$ мкс.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОСТРОЕНИЯ ПЛАНАРНОЙ ЛОКАЦИИ С ПОМОЩЬЮ СТАНДАРТНОГО И РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМОВ

Апробация предложенного алгоритма осуществлялась по результатам экспериментальных исследований, состоящих в имитации импульсов АЭ в координатах $(X; Y) = (270; 140)$, $(690; 140)$, $(275; 230)$, $(465; 260)$, $(675; 255)$, $(190; 310)$, $(470; 335)$, $(760; 305)$, $(385; 405)$, $(580; 405)$, $(475; 535)$, $(375; 595)$, $(575; 590)$, $(350; 300)$ мм. На рис. 6 показано сопоставление результатов построения планарной локации 13 источников акустических сигналов различной амплитуды с помощью стандартного и предложенного алгоритма. Размер локационного кластера был выбран из условия $D = 2 \cdot R \leq 0,1 \cdot B = 0,1 \cdot 820 = 82$ мм, где D — диаметр локационного кластера; R — радиус локационного кластера; $B = 820$ мм — максимальный размер локационной решетки.

Как показано на рис. 6а, наименьший разброс индикаций источников АЭ был зарегистрирован в координатах $(470; 335)$ мм. При имитации сигналов АЭ в точке с координатами $(470; 335)$ мм максимальное отклонение индикаций событий АЭ от центра локационного кластера радиусом $R = 41$ мм составило 16,76 мм ($\Delta = \sqrt{(X - X')^2 + (Y - Y')^2}$), где $(X'; Y') = (467,3; 318,5)$ мм — координаты индикаций АЭ-событий амплитудой $u_m \leq 65$ дБ; $(X; Y) = (470; 335)$ мм — координаты местоположения источника АЭ. Максимальная погрешность локации источников АЭ, достигающая $\Delta = 280$ мм, была зарегистрирована при генерации сигналов в координатах $(270; 145)$, $(190; 310)$, $(690; 140)$, $(760; 305)$, $(375; 595)$, $(575; 590)$ мм.

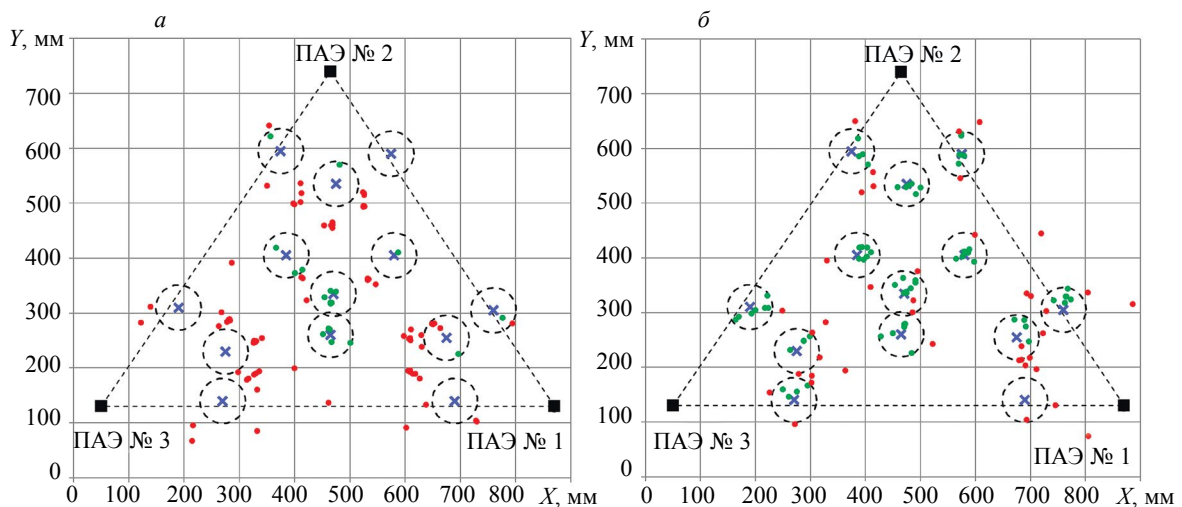


Рис. 6. Результаты построения планарной локации источников АЭ с помощью стандартного (а) и разработанного (б) алгоритмов: ■ — положение ПАЭ; × — положение источников АЭ; ● — индикации источников АЭ в локационных кластерах радиусом $R = 41$ мм; ● — индикации источников АЭ, находящиеся вне локационных кластеров.

Рост уровня погрешности стандартного алгоритма планарной локации при установке источников акустических сигналов вблизи приемных ПАЭ обусловлен влиянием дисперсии и нелинейностью процесса затухания высокочастотных мод регистрируемых импульсов АЭ [3, 17]. Перечисленные выше факторы приводят к значительной погрешности определения РВП импульсов АЭ на преобразователи антенной решетки и, как следствие, к ошибке при планарной локации с применением стандартной методики.

При генерации сигналов АЭ в координатах (470; 335) мм среднее значение абсолютной погрешности составило $\Delta = 9,67$ мм (рис. 6б). В точках с координатами (690; 140) мм максимальная погрешность индикаций источников АЭ-событий — $\Delta = 124,8$ мм. Среднее значение абсолютной погрешности стандартного алгоритма составило $\Delta = 124,8$ мм, что в 2,24 раза (280/124,8) выше, чем погрешность алгоритма Inglada при предложенной методике.

Для численной оценки погрешности стандартного и нового алгоритмов планарной локации проведен расчет количества индикаций источников АЭ с амплитудой $u_m = 45\text{—}90$ дБ, находящихся в локационных кластерах радиусом $R = 41$ мм. Центр локационных кластеров соответствует местоположению источников АЭ. Как следует из рис. 6, при установке источника акустических сигналов в координатах (470; 335) мм с помощью стандартной и новой методик с применением алгоритма Inglada было зарегистрировано $N_L = 7$ источников АЭ, удовлетворяющих условию $\Delta \leq R = 41$ мм. При установке источника акустических сигналов вблизи приемных преобразователей количество индикаций, зарегистрированное с помощью стандартного и нового алгоритмов, составляло $(N_L)_c = 2$ ед. и $(N_L)_n = 6$ ед. соответственно. Гистограммы распределения погрешностей (p) индикаций АЭ-событий, полученные с применением стандартной и новой методик, представлены на рис. 7. Значения параметра p рассчитывались следующим образом:

$$p = \frac{N_L}{N_\Sigma}, \quad (5)$$

где N_L — количество индикаций источников АЭ, удовлетворяющих условию $\Delta \leq R = 41$ мм; N_Σ — общее количество индикаций источников АЭ.

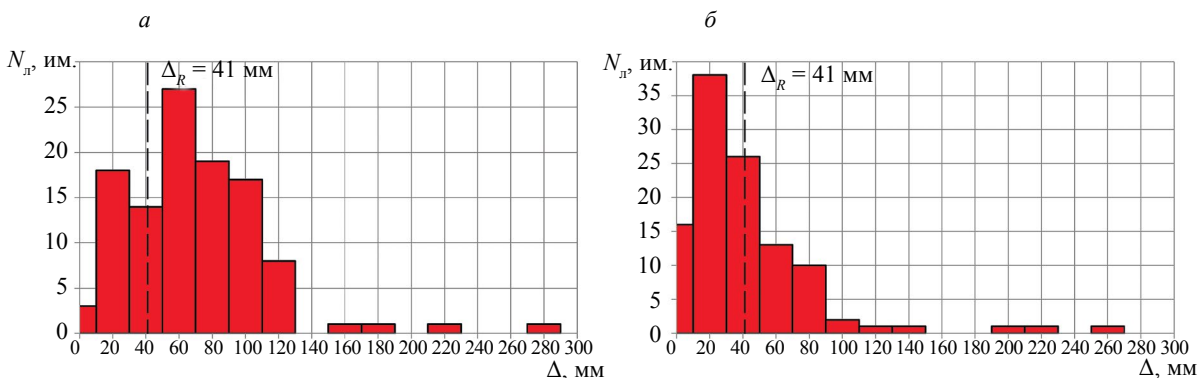


Рис. 7. Гистограмма распределения погрешности (p) индикаций АЭ-событий, полученные с применением стандартной (а) и разработанной (б) методик.

С помощью стандартной методики было зарегистрировано $N_\Sigma = 110$ индикаций АЭ-событий, из которых $(N_L)_c = 40$ удовлетворяют условию $\Delta \leq 41$ мм. В результате применения новой методики общее количество индикаций АЭ-событий, удовлетворяющих условию $\Delta \leq 41$ мм, увеличилось до $(N_L)_n = 78$ ед. Таким образом, разработанная методика построения планарной локации по сравнению со стандартной позволила увеличить вероятность обнаружения источников АЭ с $p = 0,36$ до $p = 0,71$ при базовом размере локационной решетки $B = 820$ мм.

Для численной оценки влияния радиуса локационного кластера на вероятность обнаружения источников АЭ проведен расчет параметра p для значений $R = 5, 10, \dots, 50$ мм. Результаты расчета вероятностей обнаружения источников АЭ в зависимости от радиуса локационных кластеров представлены на рис. 8.

Как показано на рис. 8, минимальные значения вероятностей обнаружения источников АЭ зарегистрировано при радиусе локационного кластера $R = 5$ мм. При увеличении радиуса локационного кластера до $R = 25$ мм отмечается повышение вероятности обнаружения источников

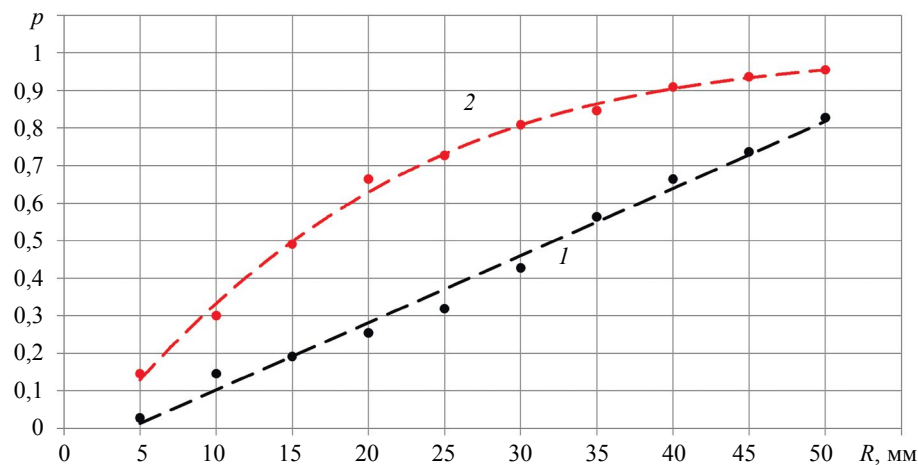


Рис. 8. Зависимость вероятности обнаружения источников АЭ в зависимости от радиуса локационного кластера, рассчитанная по результатам применения стандартного (1) и предложенного (2) алгоритмов.

АЭ до значений $p = 0,32$ и $p = 0,75$ для стандартного и предложенного алгоритмов соответственно. Необходимо отметить, что среднее значение вероятности при $R = 25\text{—}50$ мм для предложенного алгоритма ($p = 0,86$) в 1,47 раз больше, чем аналогичный результат, полученный с помощью стандартного алгоритма Inglada ($p = 0,58$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных экспериментальных исследований была разработана новая методика проведения планарной локации источников АЭ, использующая стандартный алгоритм Inglada.

Для повышения его эффективности были разработаны корреляционные зависимости $V_g/c = f(u_m)$, $\Delta t_2 = f(\chi_2)$ и $\Delta t_3 = f(\chi_3)$, учитывающие влияние амплитуды импульса на скорость его распространения (см. рис. 3) и задержку момента фиксации сигнала преобразователями АЭ вследствие порогового способа его регистрации (см. рис. 4).

Предложенная методика координатной локации источников АЭ, учитывающая эти факторы влияния на точность определения координат источников АЭ, позволила существенно снизить уровень погрешности планарной локации с использованием алгоритма Inglada. Как следует из рис. 5 и 6, новая методика проведения планарной локации по сравнению со стандартным подходом позволила увеличить вероятность обнаружения источников АЭ практически в два раза: $p_n/p_c = 0,71/0,36 = 1,972$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-19-00117).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: Спектр, 2017. 368 с.
2. Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф., Быстрова Н.А., Галкин Д.И. Основы диагностики технических устройств и сооружений. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 445 с.
3. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Иванов В.И., Елизаров С.В. Проблемы локации источников акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2021. № 9. С. 35—44.
4. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И. Акустико-эмиссионный контроль дефектов сварки. Новосибирск: Наука, 2018. 272 с.
5. Матвиенко Ю.Г., Иванов В.И., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Мищенко И.В. Определение скорости распространения волнового пакета в композитных материалах // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 1. С. 115—120.
6. Wotzka D. Influence of Frequency and Distance on Acoustic Emission Velocity Propagating in Various Dielectrics // Applied Sciences (Switzerland). 2020. V. 10. No. 9. P. 3305.
7. Chen S., Yang C., Wang G., Liu W. Similarity assessment of acoustic emission signals and its application in source localization // Ultrasonics. 2017. V. 75. P. 36—45.
8. Marchenkov A., Zhgut D., Moskovskaya D., Kulikova E., Vasiliev I., Chernov D., Mishchenko I. Estimation of acoustic source positioning error determined by one-dimensional linear location technique // Applied Sciences (Switzerland). 2022. V. 12. No. 1.

9. *Kalafat S., Sause M.G.R.* Acoustic emission source localization by artificial neural networks // *Structural Health Monitoring*. 2015. V. 14. No. 6. P. 633—647.
10. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Кожевников А.В., Мищенко И.В. Повышение вероятности выявления источников акустической эмиссии с помощью искусственных нейронных сетей // *Дефектоскопия*. 2022. № 5. С. 3—12.
11. *Grabowski K., Gawronski M., Staszewski W.J., Uhl T., Packo P.* Acoustic emission localization through excitability prediction and dispersion removal technique / *Progress in acoustic emission XVIII, JSNDI & IIIAE-23*. December 5—9. 2016. P. 217—220.
12. *Yang X., Zhou J., Gao C., Zhang P., Liu T., Zhang K., Zhang C.* An acoustic emission source localization approach based on time-reversal technology for additive manufacturing // *MATEC Web of Conferences*. 2022. V. 355. No. 5. P. 01008.
13. *Al-Jumaili S.K., Pearson M.R., Holford K.M., Eaton M.J., Pullin R.* Acoustic emission source location in complex structures using full automatic delta T mapping technique // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. V. 72—73. P. 513—524.
14. *Middleton C.A., McCrory J.P., Greene R.J., Holford K., Patterson E.A.* Detecting and Monitoring Cracks in Aerospace Materials Using Post-Processing of TSA and AE Data // *Metals*. 2019. V. 9. No. 7. P. 748.
15. *Spencer S.J.* The two-dimensional source location problem for time differences of arrival at minimal element monitoring arrays // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2007. V. 121(6). P. 3579—3594.
16. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Муравьев В.В., Комаров К.Л., Кабанов С.И., Лебедев Е.Ю., Кожмякин В.Л., Панков А.Л. Акустико-эмиссионная диагностика конструкций. М.: Радио и связь, 2000. С. 92—112.

REFERENCES

1. *Ivanov V.I., Barat V.A.* Akustiko-emissionnaya diagnostika (Acoustic-Emission Diagnostics). Moscow: Spektr, 2017.
2. *Bigus G.A., Daniev Yu.F., Bystrova N.A., Galkin D.I.* Osnovy diagnostiki tekhnicheskikh ustroystv i sooruzhenii (Fundamentals of Diagnostics of Technical Devices and Structures). Moscow: Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, 2015.
3. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Иванов В.И., Елизаров С.В. Проблемы локализации источников акустической эмиссии (Problems of Locating Acoustic Emission Sources) // *Defectoscopy*. 2021. No. 9. P. 35—44. DOI: 10.29296/defectoscopy.2021.9.35-44
4. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И. Акустико-эмиссионный контроль дефектов сварки (Acoustic-Emission Control of Welding Defects). Novosibirsk: Nauka, 2018.
5. Матвиенко Ю.Г., Иванов В.И., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Мищенко И.В. Определение скорости распространения волнового пакета в композитных материалах (Determination of Wave Packet Propagation Velocity in Composite Materials) // *Pribory i Tekhnika Eksperimenta*. 2020. No. 1. P. 115—120. DOI: 10.31857/S0032816220010231
6. *Wotzka D.* Influence of Frequency and Distance on Acoustic Emission Velocity Propagating in Various Dielectrics // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020. V. 10. No. 9. P. 3305. DOI: 10.3390/app10093305
7. *Chen S., Yang C., Wang G., Liu W.* Similarity assessment of acoustic emission signals and its application in source localization // *Ultrasonics*. 2017. V. 75. P. 36—45. DOI: 10.1016/j.ultras.2016.11.005
8. *Marchenkov A., Zhgut D., Moskovskaya D., Kulikova E., Vasiliev I., Chernov D., Mishchenko I.* Estimation of acoustic source positioning error determined by one-dimensional linear location technique // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022. V. 12. No. 1. DOI: 10.3390/app12010224
9. *Kalafat S., Sause M.G.R.* Acoustic emission source localization by artificial neural networks // *Structural Health Monitoring*. 2015. V. 14. No. 6. P. 633—647. DOI: 10.1177/1475921715607408
10. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Кожевников А.В., Мищенко И.В. Повышение вероятности выявления источников акустической эмиссии с помощью искусственных нейронных сетей (Increasing the Probability of Detecting Acoustic Emission Sources Using Artificial Neural Networks) // *Defectoscopy*. 2022. No. 5. P. 3—12. DOI: 10.29296/defectoscopy.2022.5.3-12
11. *Grabowski K., Gawronski M., Staszewski W.J., Uhl T., Packo P.* Acoustic emission localization through excitability prediction and dispersion removal technique / *Progress in Acoustic Emission XVIII, JSNDI & IIIAE-23* (December 5—9, 2016). P. 217—220.
12. *Yang X., Zhou J., Gao C., Zhang P., Liu T., Zhang K., Zhang C.* An acoustic emission source localization approach based on time-reversal technology for additive manufacturing / *MATEC Web of Conferences*. 2022. V. 355. No. 5. P. 01008. DOI: 10.1051/mateconf/202235501008
13. *Al-Jumaili S.K., Pearson M.R., Holford K.M., Eaton M.J., Pullin R.* Acoustic emission source location in complex structures using full automatic delta T mapping technique // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. V. 72—73. P. 513—524. DOI: 10.1016/j.ymssp.2016.09.005
14. *Middleton C.A., McCrory J.P., Greene R.J., Holford K., Patterson E.A.* Detecting and Monitoring Cracks in Aerospace Materials Using Post-Processing of TSA and AE Data // *Metals*. 2019. V. 9. No. 7. P. 748. DOI: 10.3390/met9070748

15. *Spencer S.J.* The two-dimensional source location problem for time differences of arrival at minimal element monitoring arrays // The Journal of the Acoustical Society of America. 2007. V. 121. No. 6. P. 3579—3594. DOI: 10.1121/1.2717430

16. *Ser'eznov A.N., Stepanova L.N., Murav'ev V.V., Komarov K.L., Kabanov S.I., Lebedev E.Yu., Kojemakin V.L., Pan'kov A.F.* Akustiko-emissionnaya diagnostika konstrukstruktsiy (Acoustic-Emission Diagnostics of Structures). Moscow: Radio i Svyaz, 2000. P. 92—112.
