
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ, ВЕЩЕСТВ, МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ (05.11.13)

УДК 620.179.17

DOI: 10.24160/1993-6982-2022-1-130-136

Влияние амплитуды акустических сигналов на вероятность выявления источников акустической эмиссии

Д.В. Чернов, И.Е. Васильев, А.Ю. Марченков, Т.Ю. Ковалева, Е.А. Куликова, И.В. Мищенко,
М.В. Горячкина

Рассмотрены результаты применения стандартного алгоритма линейной локации источников акустических сигналов, генерируемых широкополосным преобразователем акустической эмиссии (АЭ), установленным на поверхности стальной пластины размером 1000×650×7 мм. Для генерации импульсов АЭ амплитудой $u_m = 55\text{--}100$ дБ разность потенциалов электронного имитатора изменяли в диапазоне 10...300 В.

В результате проведения лабораторных исследований проведен расчет приведенной погрешности стандартного алгоритма линейной локации γ . Максимальная погрешность, равная $\gamma = 16,3\%$, зарегистрирована в координате $X = 100$ мм при локализации источника акустических сигналов амплитудой менее 60 дБ и базовом размере антенной решетки $B = 800$ мм. Минимальный уровень погрешности $\gamma = 2,69\%$ зафиксирован при установке электронного имитатора в координате $X = 400$ мм. Показано, что максимальный уровень погрешности стандартного алгоритма определяется при локализации источников низкоамплитудных сигналов АЭ, расположенных вблизи приемных преобразователей антенной решетки.

Приведен расчет вероятности выявления источников АЭ в зависимости от амплитуды регистрируемых импульсов. Для определения вероятности выявления источников АЭ p поток регистрируемых сигналов разделен на три амплитудных диапазона: 1 — 40...60 дБ; 2 — 60...75 дБ; 3 — 75...100 дБ. Для источников акустических сигналов амплитудой менее 60 дБ, расположенных в координатах $X = 100, 200, 600$ и 700 мм, значение параметра p стремится к нулю. В процессе обработки результатов экспериментальных исследований выявлено, что вероятность выявления источников АЭ повышается при увеличении максимальной амплитуды регистрируемых сигналов. Для импульсов АЭ, амплитуда которых превышает 75 дБ, значение параметра p стремится к 1 независимо от местоположения источника. Установлено, что погрешность стандартного алгоритма линейной локации зависит от удаленности источника АЭ от приемных преобразователей антенной решетки. В качестве численной оценки влияния перечисленных факторов на результаты построения локационной картины продемонстрирована зависимость $p(X, u_m)$.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, линейная локация, вероятность выявления источника АЭ, приведенная погрешность.

Для цитирования: Чернов Д.В., Васильев И.Е., Марченков А.Ю., Ковалева Т.Ю., Куликова Е.А., Мищенко И.В., Горячкина М.В. Влияние амплитуды акустических сигналов на вероятность выявления источников акустической эмиссии // Вестник МЭИ. 2022. № 1. С. 130—136. DOI: 10.24160/1993-6982-2022-1-130-136.

The Influence of Acoustic Signal Amplitude on the Acoustic Emission Source Detection Probability

D.V. Chernov, I.E. Vasil'ev, A.Yu. Marchenkov, T.Yu. Kovaleva, E.A. Kulikova, I.V. Mishchenko, M.V. Goryachkina

The article discusses the results of using a standard algorithm for linearly locating the sources of acoustic emission signals generated by a broadband acoustic emission (AE) transducer mounted on the surface of a steel plate with sizes 1000×650×7 mm. To generate AE impulses with an amplitude of $u_m = 55\text{--}100$ dB, the electronic simulator's difference of potentials was varied in the range of 10–300 V. As a result of laboratory experiments, the reduced error γ of the standard linear location algorithm was calculated. The maximum error equal to $\gamma = 16.3\%$ was recorded at the coordinate $X = 100$ mm in locating the source of acoustic signals with an amplitude of less than 60 dB and the antenna array basic size $B = 800$ mm. The minimum error equal to $\gamma = 2.69\%$ was recorded with the electronic simulator installed at the coordinate $X = 400$ mm. It is shown that the maximum error of the standard algorithm is observed in locating the sources of low-amplitude AE signals situated near the antenna array receiving transducers. The AE source detection probability as a function of recorded impulse amplitude is quantified. For determining the AE source detection probability p , the flow of recorded signals was divided into three amplitude ranges: 40–60 dB, 60–75 dB, and 75–100 dB. For the sources of acoustic signals with an amplitude of less than 60 dB and located at the coordinates $X = 100, 200, 600,$ and 700 mm, the parameter p value tends to zero. It has been revealed in processing the experimental study results that the AE source detection probability increases with a growth in the maximum amplitude of the recorded signals. For AE impulses with an amplitude above 75 dB, the parameter p value approaches unity regardless of the source location. It has been determined that the error of the standard linear location algorithm depends on the distance between the AE source and the antenna array receiving transducers. The dependence $p(X, u_m)$ has been demonstrated as a numerical assessment of the way in which the above-mentioned factors influence the obtained location picture results.

Key words: acoustic emission, linear location, acoustic emission source detection probability, reduced error.

For citation: Chernov D.V., Vasil'ev I.E., Marchenkov A.Yu., Kovaleva T.Yu., Kulikova E.A., Mishchenko I.V., Goryachkina M.V. The Influence of Acoustic Signal Amplitude on the Acoustic Emission Source Detection Probability. Bulletin of MPEI. 2022;1:130—136. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2022-1-130-136.

Введение

В настоящее время акустическая эмиссия — наиболее распространенный метод неразрушающего контроля, при помощи которого диагностируют развивающиеся дефекты и повреждения в процессе нагружения исследуемых объектов [1 — 4]. Согласно нормативным документам (ПБ 03-593—03), импульсы, принятые преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ), регистрируются и обрабатываются АЭ-системой в момент, когда уровень их напряжения превышает порог установленного напряжения дискриминации сигналов u_{th} . На основании разности времени прихода импульсов (РВП) на ПАЭ локационной группы с учетом их групповой скорости V_g в стенке изделия и расстояния ΔL между преобразователями определяют координаты источников АЭ. Стандартный алгоритм локации источников АЭ событий, регламентированный ПБ 03-593—03, не учитывает влияние диспергирующей среды на скорость распространения упругих волн и разность времен прихода импульсов на преобразователи антенной решетки Δt . Одно из возможных решений существующей проблемы — применение методик расчета координат источников АЭ событий при помощи алгоритма « Δt -mapping» [5 — 9]. Такой подход обеспечивает высокую точность построения локации при диагностике изотропных объектов. Однако, нелинейность акустического тракта, быстрое затухание высокочастотных мод волнового пакета и влияние ближней зоны измерительных преобразователей ведут

к повышению погрешности применения метода « Δt -mapping». Для снижения погрешности указанного алгоритма необходимо проведение большого количества предварительных испытаний, что затрудняет диагностику элементов конструкций сложной формы.

С целью повышения точности локационных алгоритмов следует оценить влияние перечисленных факторов на погрешность расчета координат источников АЭ-событий. Цель настоящей работы — численная оценка влияния ближней зоны и процесса затухания высокочастотных составляющих спектра на значения приведенной погрешности и вероятности выявления дефектов методом АЭ. Полученные результаты могут быть использованы при модернизации существующих подходов и составления аналитических моделей процесса накопления повреждений по результатам акустико-эмиссионной диагностики [10, 11].

Методика проведения исследований

Для оценки вероятности выявления источников АЭ-событий проведена серия лабораторных испытаний по локализации имитатора акустических сигналов, установленного на поверхности стальной пластины размером 1000×650×7 мм. Координаты локации источников АЭ вычисляли, исходя из стандартной методики, регламентированной ПБ 03-593—03. Перед началом проведения испытаний определяли оптимальные настройки системы сбора и обработки акустических сигналов Vallen AMSY-6. Порог дискриминации им-

пульсов АЭ составил $u_{th} = 40$ дБ, а полоса пропускания цифровых фильтров равна $\Delta f_p = 50...850$ кГц. Для построения линейной локации необходимо определить фактическую скорость распространения импульсов АЭ V_g . Для расчета параметра V_g с применением источника Су-Нильсена (грифеля цангового карандаша диаметром 0,3 мм) выполнена генерация импульсов АЭ. В результате обработки АЭ-данных расчетное значение скорости составило $V_g = 4250$ м/с при максимальном размере зоны локации $B = 800$ мм.

Для линейной локации источников АЭ использованы полосовые преобразователи VS150-RIC со встроенных предусилителем. Максимальная чувствительность используемых сенсоров наблюдалась в частотном диапазоне 150...160 кГц. Измерительные преобразователи устанавливали на поверхность стальной пластины таким образом, чтобы размер антенной решетки составил $B = 800$ мм. Акустические сигналы генерировали при помощи электронного имитатора «ИНТЕРЮНИС-ИТ» с подключенным широкополосным преобразователем UT-1000 фирмы «Mistras» (США). На рисунке 1 представлена схема взаимного расположения электронного имитатора и приемных преобразователей, расположенных на поверхности стальной пластины.

Преобразователь, подключенный к имитатору, установлен в координатах $X = 100, 200, \dots 700$ мм относительно ПАЭ № 1. В процессе генерации акустических сигналов амплитуда регистрируемых импульсов АЭ менялась в диапазоне 55...100 дБ. В результате сегментации результатов построения линейной локации рассчитана приведенная погрешность:

$$\gamma = \frac{|X_{\text{ист}} - X_p|}{B},$$

где γ — значение приведенной погрешности; $X_{\text{ист}}$ — координата установки имитатора акустических сигналов; X_p — расчетное значение местоположения источника АЭ; B — расстояние между преобразователями антенной решетки.

По результатам расчета погрешности оценивали вероятность выявления источника АЭ (p). В связи с тем, что погрешность стандартного алгоритма локации в значительной степени зависит от энергетических и

спектральных характеристик регистрируемых сигналов, то расчет вероятностных оценок проходил в трех амплитудных диапазонах: 40...60, 60...75 и 75...100 дБ. Значение параметра p получали следующим образом:

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

где $N_L(X)$ — количество АЭ-событий, слоцированных в доверительном интервале $L = [(X - 0,1B); (X + 0,1B)]$, N_{Σ} — общее количество слоцированных АЭ-событий.

Результаты исследования

Исходя из сопоставления результатов линейной локации координат источников АЭ с их точным расположением между ПАЭ, проведена оценка погрешности применяемой методики. На рисунке 2 изображен результат локации источников АЭ, зарегистрированный системой Vallen AMSY-6.

Как следует из рис. 2, наибольшая погрешность стандартного алгоритма линейной локации отмечается при удалении источника АЭ от ПАЭ на расстояние $\Delta X \leq 200$ мм. При положении источника АЭ на расстоянии, меньшем 200 мм, невозможно однозначно установить его местоположение, что подтверждается рассеянным накоплением АЭ-событий. Для $X = 600$ и 700 мм отмечается значительное отклонение расчетной координаты от фактического местоположения источника АЭ.

В ходе проведенных исследований [12] установлено, что погрешность координатной локации источников АЭ при применении методики порогового метода регистрации импульсов алгоритма возникает вследствие дисперсионных свойств среды, нелинейности процесса затухания высокочастотных составляющих в спектре импульсов АЭ. Перечисленные факторы приводят к изменению разности времен прихода импульсов Δt на преобразователи антенной решетки. Следует отметить, что рассеяние локации источников АЭ снижает вероятность выявления развивающихся повреждений в структуре материала диагностируемого изделия.

В ходе экспериментов амплитуда источников АЭ варьировалась в широком диапазоне от 55 до 100 дБ. При вычислении координат низкоэнергетических источников АЭ с применением стандартного алгоритма



Рис. 1. Схема построения линейной локации источников АЭ

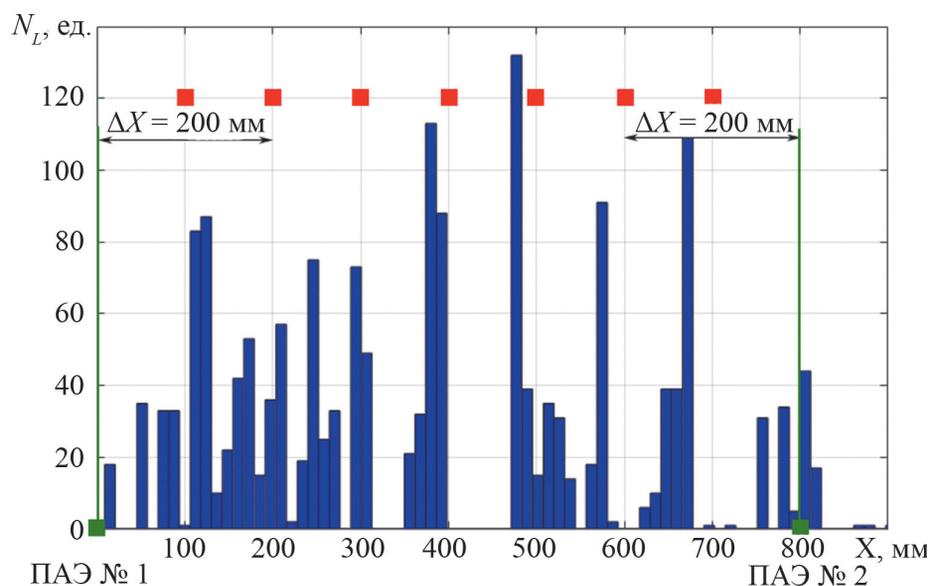


Рис. 2. Результат построения линейной локации источников АЭ:

■, ■ — положения источников и приемников АЭ

погрешность линейной локации достигала 16,3% при уровне амплитуды в источнике $u_m = 55$ дБ. При базовом размере антенной решетки $B = 800$ мм такой уровень погрешности дает отклонение расчетного значения X_p от фактического местоположения источника АЭ на 146,4 мм. Таким образом, при диагностике развивающихся повреждений в конструкционных сталях и алюминиевых сплавах, для которых характерно образование низкоэнергетических источников АЭ-событий, применение стандартного алгоритма линейной локации сопровождается значительным уровнем погрешности γ (рис. 3).

Из данных рис. 3 следует, что максимальный уровень погрешности стандартного алгоритма линейной локации фиксируется при генерации акустических

сигналов вблизи приемных преобразователей. Минимальный разброс локации координат источника АЭ, не превышающий 2,5%, отмечается в середине образца, где локация практически не зависит от скорости распространения импульса. Увеличение разброса координатной локации источников АЭ по мере приближения их к ПАЭ обусловлено особенностью применения стандартного алгоритма, использующего при расчете среднее значение групповой скорости V_g и разность времен прихода импульсов АЭ на преобразователи антенной решетки. При локации источников АЭ, равноудаленных от приемных преобразователей, значение Δt стремится к нулю, что в значительной степени снижает влияние значения групповой скорости на погрешность определения координаты источника.

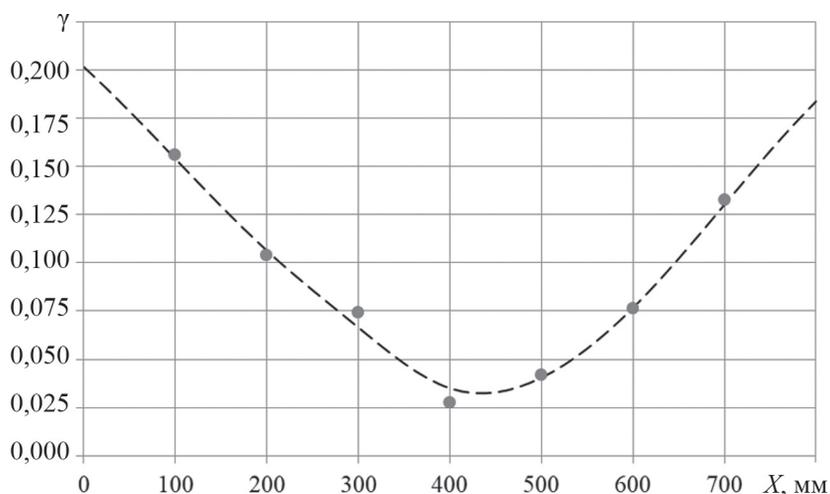


Рис. 3. Изменение величины погрешности γ , определенное относительно базового размера локации $B = 800$ мм в зависимости от положения источника АЭ событий при уровне его максимальной амплитуды $u_m = 55$ дБ

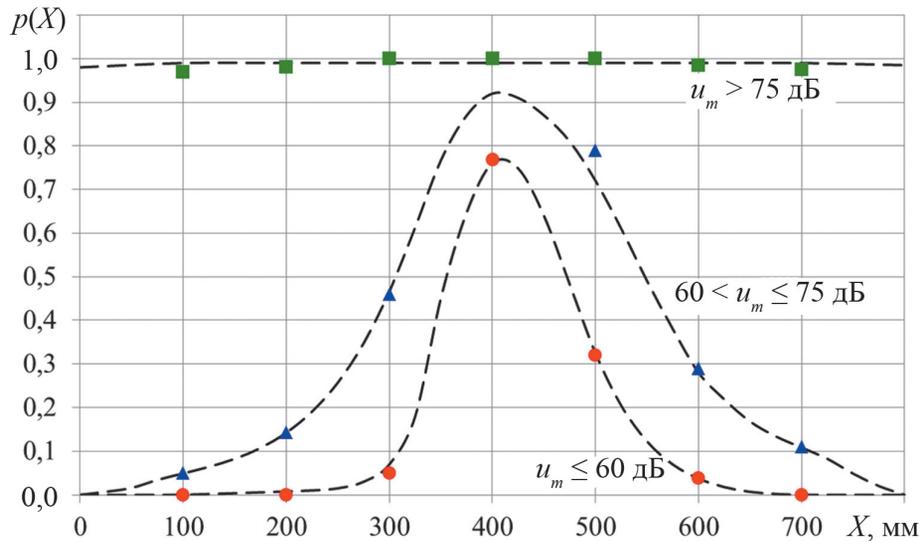


Рис. 4. Вероятность выявления источника АЭ в зависимости от удаленности источника АЭ от ПАЭ при изменении уровня амплитуды регистрируемых импульсов в диапазоне от 55 до 100 дБ

На рисунке 4 даны графики изменения вероятности выявления источников АЭ в зависимости от удаленности источника АЭ от ПАЭ при изменении уровня амплитуды регистрируемых импульсов в диапазоне от 55 до 100 дБ.

Согласно [1], более 90% акустических сигналов, регистрируемых при испытаниях изделий из сталей и алюминиевых сплавов, обладают амплитудой меньше 60 дБ. В связи с этим, применение стандартного алгоритма измерения скорости с использованием имитатора Су-Нильсена не позволяет установить оптимальное значение V_g для построения точной локации. На рисунке 4 продемонстрировано, что вероятность выявления источников акустических сигналов амплитудой менее 60 дБ, расположенных в ближней зоне измерительных преобразователей, стремится к нулю. При регистрации сигналов в диапазоне $60 < u_m \leq 75$ дБ вероятность выявления источников АЭ повышается, а в центральной зоне может достигать 0,92. Применение стандартного алгоритма локации для высокоамплитудных сигналов стремится к 1 независимо от местоположения источника АЭ. Таким образом, при создании линейной локации следует не только учитывать амплитуду регистри-

руемых сигналов, но и удаленность источника АЭ от приемных преобразователей.

Заключение

Выполнена оценка погрешности определения координатной локации источников АЭ с помощью стандартного алгоритма. Установлено, что точность стандартного алгоритма зависит от удаленности источника АЭ от ПАЭ и амплитуды регистрируемых сигналов. Локация низкоамплитудных источников АЭ в ближней зоне приемного преобразователя на расстоянии, меньшем 200 мм, приводит к повышению погрешности до 16,3% относительно базового размера $B = 800$ мм, а вероятность выявления источника АЭ событий стремится к нулю.

В качестве численной оценки влияния перечисленных факторов построена зависимость $p(X, u_m)$. Для минимизации диспергирующего воздействия среды на акустические характеристики регистрируемых импульсов в ближней зоне от ПАЭ необходимо использовать дополнительные корреляционные зависимости $u_m(V_g)$ и $p(X, u_m)$, что повысит вероятность выявления низкоэнергетических источников АЭ и снизит погрешность их координатной локации.

Литература

1. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: Спектр, 2017.
2. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В. Диагностика разрушений и повреждений акустико-эмиссионным методом // Приводы и компоненты машин. 2018. № 5. С. 13—19.
3. Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Pankov V.A. Acoustic-emission Monitoring of Airframe Failure under Cyclic Loading // Russian J. Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 8. Pp. 570—580.

References

1. Ivanov V.I., Barat V.A. Akustiko-emissionnaya Diagnostika. M.: Spektr, 2017. (in Russian).
2. Matvienko Yu.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V. Diagnostika Razrusheniy i Povrezhdeniy Akustiko-emissionnym Metodom. Privody i Komponenty Mashin. 2018;5L13—19. (in Russian).
3. Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Pankov V.A. Acoustic-emission Monitoring of Airframe Failure under Cyclic Loading. Russian J. Nondestructive Testing. 2019;55;8:570—580.

4. **Васильев И.Е., Матвиенко Ю.Г., Чернов Д.В., Елизаров С.В.** Мониторинг накопления повреждений в кессоне стабилизатора планера МС-21 с применением акустической эмиссии // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020. № 2. С. 118—141.

5. **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 Proc. 2016. V. 72. Pp. 513—524.

6. **Hensman J., Mills R., Pierce S.G., Worden K., Eaton M.** Locating Acoustic Emission Sources in Complex Structures Using Gaussian Processes // Mechanical Systems and Signal Proc. 2010. V. 24(1). Pp. 211—223.

7. **Kundu T.** Acoustic Source Localization // Ultrasonics. 2014. V. 54(1). Pp. 25—38.

8. **Kurz J.** New Approaches for Automatic Three Dimensional Source Localization of Acoustic Emissions — Applications to Concrete Specimens // Ultrasonics. 2016. V. 63. Pp. 155—162.

9. **Eaton M.J., Pullin R., Holford K.M.** Acoustic Emission Source Location in Composite Materials Using Delta T Mapping // Composites Pt. A: Appl. Sci. and Manufacturing. 2012. V. 43(6). Pp. 856—863.

10. **Gerasimov S.I., Sych T.V.** Finite Element Modeling of Acoustic Emission Sensors // J. Physics: Conf. Series. 2017. V. 881. P. 012003.

11. **Nosov V.V., Zelenskii N.A.** Estimating the Strength of Welded Hull Elements of a Submersible Based on the Micromechanical Model of temporal Dependences of Acoustic-emission Parameters // Russian J. Nondestructive Testing. 2017. V. 53. No. 2. Pp. 89—95.

12. **Makhutov N.A., Vasil'iev I.E., Chernov D.V., Ivanov V.I., Elizarov S.V.** Influence of the Passband of Frequency Filters on the Parameters of Acoustic Emission Pulses // Russian J. Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 3. Pp. 173—180.

4. **Vasil'ev I.E., Matvienko Yu.G., Chernov D.V., Elizarov S.V.** Monitoring Nakopleniya Povrezhdeniy v Kessone Stabilizatora Planera MS-21 s Primeneniem Akusticheskoy Emissii. Problemy Mashinostroeniya i Avtomatizatsii. 2020;2:118—141. (in Russian).

5. **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 Proc. 2016;72:513—524.

6. **Hensman J., Mills R., Pierce S.G., Worden K., Eaton M.** Locating Acoustic Emission Sources in Complex Structures Using Gaussian Processes. Mechanical Systems and Signal Proc. 2010;24(1):211—223.

7. **Kundu T.** Acoustic Source Localization. Ultrasonics. 2014;54(1):25—38.

8. **Kurz J.** New Approaches for Automatic Three Dimensional Source Localization of Acoustic Emissions — Applications to Concrete Specimens. Ultrasonics. 2016;63:155—162.

9. **Eaton M.J., Pullin R., Holford K.M.** Acoustic Emission Source Location in Composite Materials Using Delta T Mapping. Composites Pt. A: Appl. Sci. and Manufacturing. 2012;43(6):856—863.

10. **Gerasimov S.I., Sych T.V.** Finite Element Modeling of Acoustic Emission Sensors. J. Physics: Conf. Series. 2017;881:012003.

11. **Nosov V.V., Zelenskii N.A.** Estimating the Strength of Welded Hull Elements of a Submersible Based on the Micromechanical Model of temporal Dependences of Acoustic-emission Parameters. Russian J. Nondestructive Testing. 2017;53;2:89—95.

12. **Makhutov N.A., Vasil'iev I.E., Chernov D.V., Ivanov V.I., Elizarov S.V.** Influence of the Passband of Frequency Filters on the Parameters of Acoustic Emission Pulses. Russian J. Nondestructive Testing. 2019;55;3:173—180.

Сведения об авторах:

Чернов Дмитрий Витальевич — кандидат технических наук, научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, e-mail: ChernovDmV@mpei.ru

Васильев Игорь Евгеньевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, e-mail: via03@mail.ru

Марченков Артем Юрьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов НИУ «МЭИ», e-mail: MarchenkovAY@mpei.ru

Ковалева Татьяна Юрьевна — кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительных машин, систем, сетей НИУ «МЭИ», e-mail: KovalevaTY@mpei.ru

Куликова Екатерина Александровна — старший преподаватель кафедры диагностических информационных технологий НИУ «МЭИ», e-mail: KulikovaYA@mpei.ru

Мищенко Иван Владимирович — младший научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, e-mail: MishchenkoIV@mpei.ru

Горячкина Мария Викторовна — старший преподаватель кафедры технологии металлов НИУ «МЭИ», e-mail: GoriachkinaMV@mpei.ru

Information about authors:

Chernov Dmitriy V. — Ph.D. (Techn.), Research Associate of A.A. Blagonravov Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences, e-mail: ChernovDmV@mpei.ru

Vasil'ev Igor E. — Ph.D. (Techn.), Senior Researcher of A.A. Blagonravov Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences, e-mail: via03@mail.ru

Marchenkov Artem Yu. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Metal Technology Dept., NRU MPEI, e-mail: MarchenkovAY@mpei.ru

Kovaleva Tatyana Yu. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Computing Machines, Systems and Networks Dept., NRU MPEI, e-mail: KovalevaTY@mpei.ru

Kulikova Ekaterina A. — Senior Lecturer Diagnostic Information Technologies Dept., NRU MPEI, e-mail: KulikovaYA@mpei.ru

Mishchenko Ivan V. — Junior Researcher of A.A. Blagonravov Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences, e-mail: MishchenkoIV@mpei.ru

Goryachkina Mariya V. — Senior Lecturer of Metal Technology Dept., NRU MPEI, e-mail: GoriachkinaMV@mpei.ru

Работа выполнена при поддержке: Российского научного фонда (проект № 20-19-00769)

The work is executed at support: Russian Science Foundation (Project No. 20-19-00769)

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 07.06.2021

The article received to the editor: 07.06.2021