



ISSN 0130-3082

Российская Академия наук

Дефектоскопия



Неразрушающий контроль
Техническая диагностика
Анализ материалов

№ 12

2024



НАУКА
— 1727 —

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
Основан в феврале 1965 года
Екатеринбург

№ 12
2024

СОДЕРЖАНИЕ

Акустические методы

Ю.Г. Матвиенко, И.Е. Васильев, Т.Д. Баландин, Д.В. Чернов. Особенности построения планарной локации источников акустической эмиссии с помощью триангуляционного алгоритма Inglada	3
Е.Г. Базулин. Применение технологий CF и DMAS для повышения качества изображения отражателей, восстановленного по эхосигналам, измеренным антенной решеткой.....	14
Д.А. Дерусова, В.О. Нехорошев, В.Ю. Шпильной, А.В. Raut. Применение импульсного газоразрядного электроакустического преобразователя для задач дефектоскопии	30
О.В. Муравьева, Л.А. Денисов, О.П. Богдан, А.В. Блинова. Влияние плотности листов термо-расширенного графита на прохождение акустической волны	44

Рентгеновские методы

С.А. Григорченко, В.И. Капустин. Повышение эффективности идентификации изображений дефектов при компьютерной расшифровке цифровых радиографических изображений сварных соединений опасных производственных объектов	59
--	----

Электромагнитные методы

К.Е. Мызнов, О.Н. Василенко, В.Н. Костин, В.С. Тронза, А.Н. Бондина, С.С. Кукушкин, Н.Ю. Трякина, А.С. Саломатин. Оценка напряженно-деформированного состояния трубопроводов по результатам измерения магнитных характеристик в полевых условиях	69
Информация	81

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

Разработка методики повышения эффективности обнаружения источников акустической эмиссии (АЭ) при планарной локации с применением алгоритма Inglaada 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_s), 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 $u_m = 45—90$ дБ. При этом положение источника излучения импульсов АЭ варьировало 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 Inglaada, 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, Maly Kharitonovsky 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 Inglaada'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_s), 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 $u_m = 45—90$ 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, Inglaada'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 ($\Delta t_{1,2}, \Delta t_{2,3}, \Delta t_{1,3}$) 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 акусто-эмиссионного контроля судов, 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 Inglaada. 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 Inglaada.

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

Одним из наиболее распространенных методов построения планарной локации источников АЭ является триангуляционный алгоритм Inglaada, 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 Inglaada:

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

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

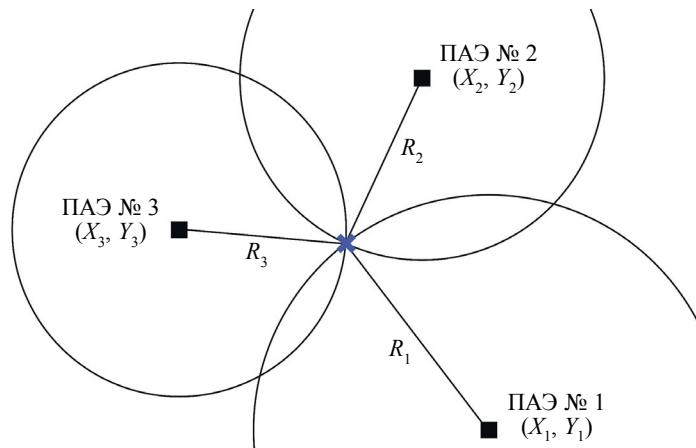


Рис. 1. Определение местоположения источника АЭ с помощью алгоритма Ingлада: $R_i = V_g(t_i - t)$, где t_i — время регистрации импульса i -м ПАЭ; X_i, Y_i — координаты установки ПАЭ (■); X, Y — координаты источника АЭ (✖).

В результате расчета координат источника АЭ с помощью триангуляционного алгоритма Ingлада 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 $u_m = 45—90$ дБ на поверхности алюминиевой пластины размером $990 \times 850 \times 7$ мм. В качестве источника импульсов АЭ различной амплитуды использовался преобразователь R15a-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 $\Delta f_p = 100—300$ кГц, расчетная скорость распространения импульсов $V = 3300$ 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 R15a-AST фирмы «Mistras» (США) с высокой чувствительностью в диапазоне частот 100—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 свыше 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.

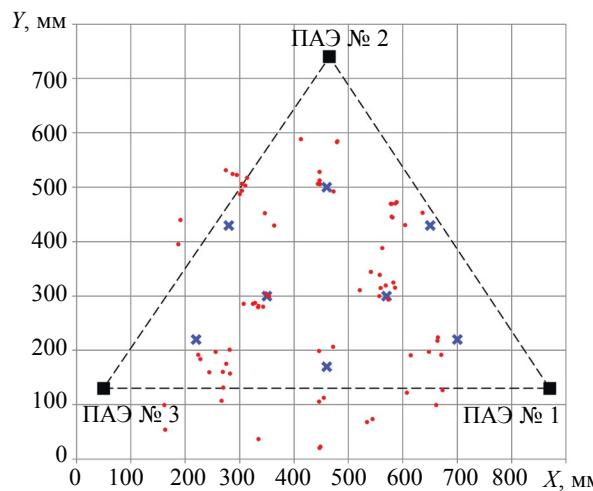


Рис. 2. Результаты построения планарной локации источников АЭ с помощью стандартного алгоритма Ingлада.

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 сигналов, имел наименьшее время нарастания.

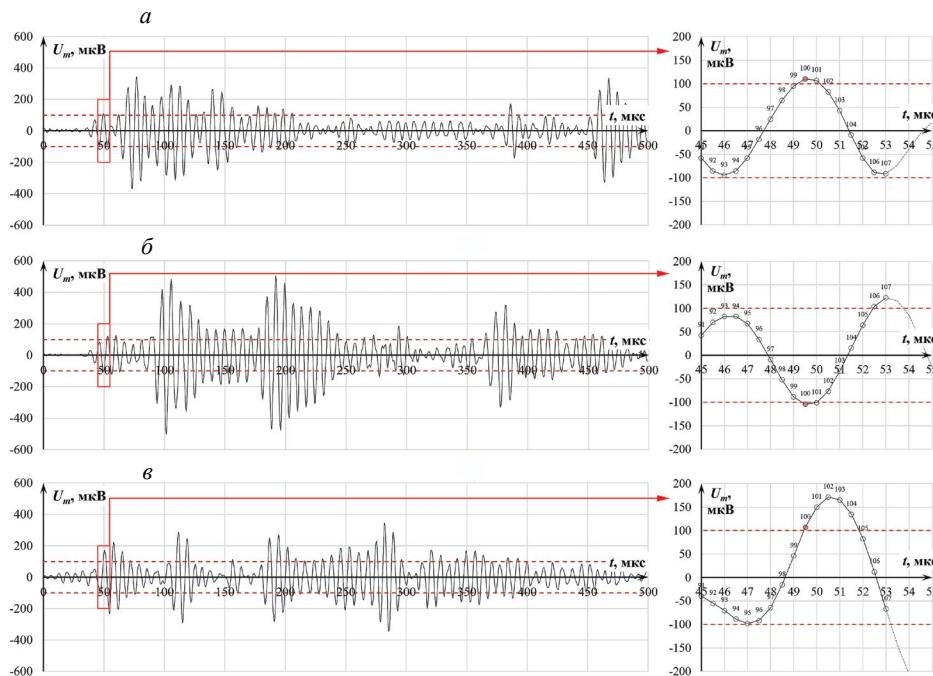


Рис. 3. Характерные формы импульсов АЭ, зарегистрированные с помощью ПАЭ № 2 (а); ПАЭ № 3 (б); ПАЭ № 1 (в). Координата имитации сигналов АЭ $(X; Y) = (225; 490)$ мм.

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—6000 м/с по известным из предварительных испытаний значениям координат имитации X, Y и полученным временем 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 $u_m = 55$ —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 $R = 0,71$.

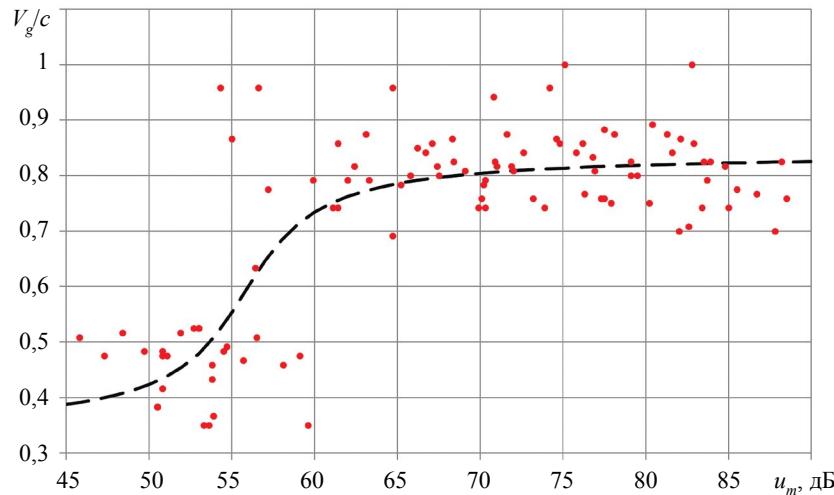


Рис. 4. Зависимость нормированной скорости (V_g/c) распространения импульсов АЭ от уровня их амплитуды (u_m).

Погрешность стандартного алгоритма локации зависит не только от точности определения времени регистрации импульса 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:

$$\begin{aligned}\chi_2 &= 0,11 \cdot (t_2 - t_1) - 0,41 \cdot u_{m_1} + 0,08 \cdot \frac{N_{u_1}}{t_{u_1}} - 0,07 \cdot u_{m_2} + 0,16 \cdot \frac{N_{u_2}}{t_{u_2}} + 2,68; \\ \chi_3 &= 0,02 \cdot (t_3 - t_1) - 0,03 \cdot u_{m_1} + 3,41 \cdot \frac{N_{u_1}}{t_{u_1}} - 0,04 \cdot u_{m_3} + 1,07 \cdot \frac{N_{u_3}}{t_{u_3}} + 17,62,\end{aligned}\quad (3)$$

где $u_{m_1}, u_{m_2}, u_{m_3}$ — амплитуды импульсов АЭ; N_{u_i}/t_{u_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 $u_{m_1}, N_{u_i}/t_{u_i}$ 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 $R = 0,76$:

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

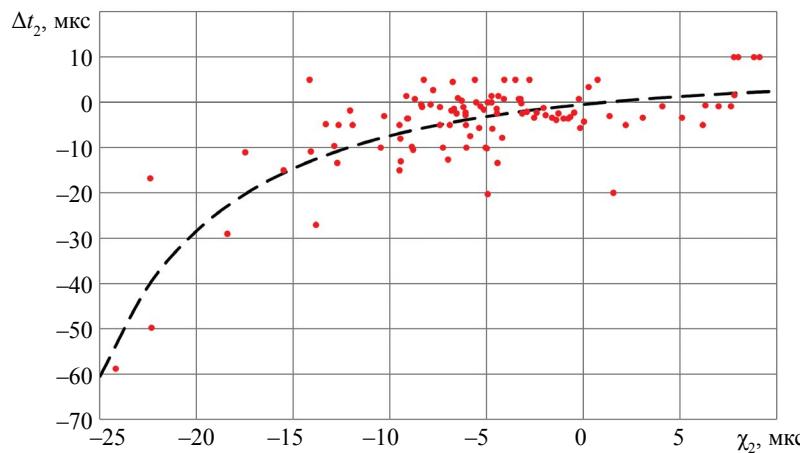


Рис. 5. Погрешность определения времени регистрации импульса АЭ.

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.

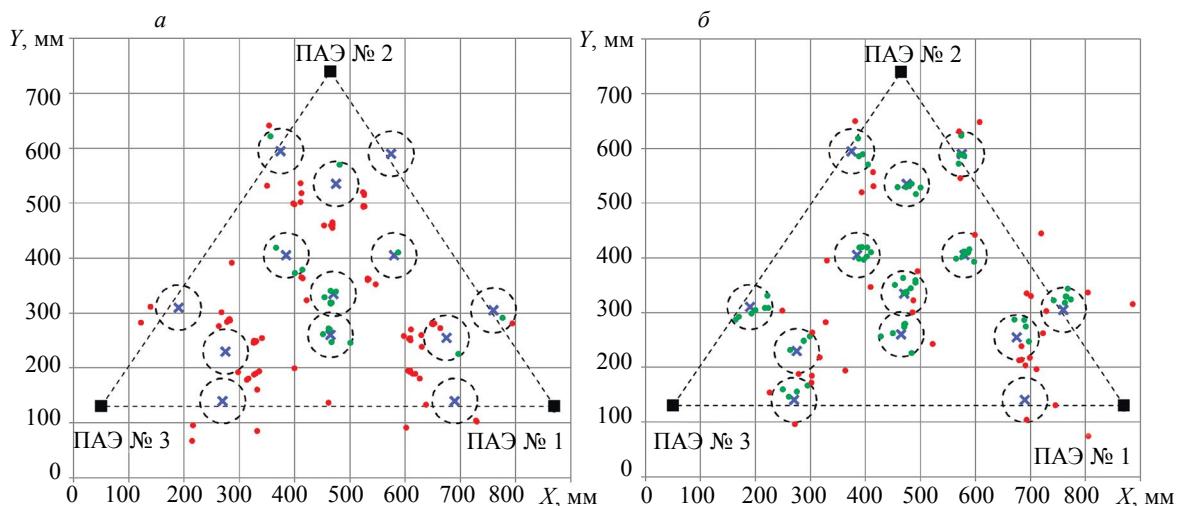


Рис. 6. Результаты построения планарной локации источников АЭ с помощью стандартного (а) и разработанного (б) алгоритмов: ■ — положение ПАЭ; ✕ — положение источников АЭ; ● — индикации источников АЭ в локационных кластерах радиусом $R = 41$ мм; ● — индикации источников АЭ, находящиеся вне локационных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

Для численной оценки погрешности стандартного и нового алгоритмов планарной локации проведен расчет количества индикаций источников АЭ с амплитудой $u_m = 45—90$ 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 Inglaada 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.

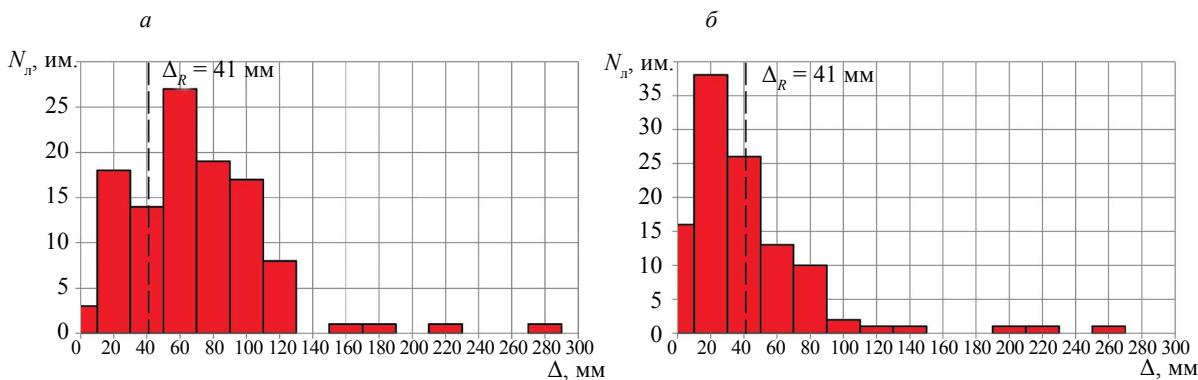


Рис. 7. Гистограмма распределения погрешности (p) индикаций АЭ-событий, полученные с применением стандартной (а) и разработанной (б) методик.

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

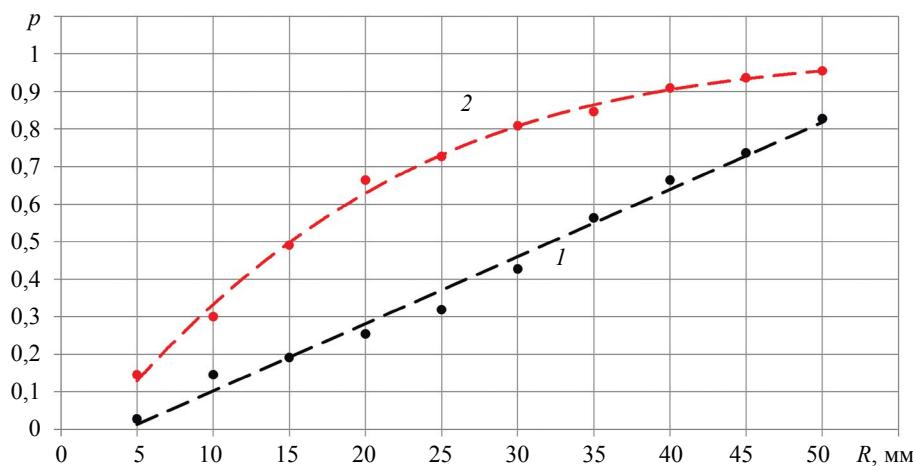


Рис. 8. Зависимость вероятности обнаружения источников АЭ в зависимости от радиуса локационного кластера, рассчитанная по результатам применения стандартного (1) и предложенного (2) алгоритмов.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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 Ingлада. 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: $p_{\text{н}}/p_{\text{c}} = 0,71/0,36 = 1,972$.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.И., Барат В.А. Акусто-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. Акусто-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. Серезнов А.Н., Степанова Л.Н., Муравьев В.В., Комаров К.Л., Кабанов С.И., Лебедев Е.Ю., Кожемякин 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 ustroistv i sooruzhenii (Fundamentals of Diagnostics of Technical Devices and Structures). Moscow: Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, 2015.
3. Matvienko Yu.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Ivanov V.I., Elizarov S.V. Problemy lokatsii istochnikov akusticheskoy emissii (Problems of Locating Acoustic Emission Sources) // Defectoscopiya. 2021. No. 9. P. 35—44. DOI: 10.29296/defectoscopy.2021.9.35-44
4. Ser'eznov A.N., Stepanova L.N., Kabanov S.I. Akustiko-emissionnyy kontrol' defektov svarki (Acoustic-Emission Control of Welding Defects). Novosibirsk: Nauka, 2018.
5. Matvienko Yu.G., Ivanov V.I., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Mishchenko I.V. Opredelenie skorosti rasprostraneniya volnovogo paketa v kompozitnykh materialakh (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. Matvienko Yu.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Kozhevnikov A.V., Mishchenko I.V. Povishenie veroyatnosti viavleniya istochnikov akusticheskoy emissii s pomoshch'yu iskusstvennykh nevronnykh setey (Increasing the Probability of Detecting Acoustic Emission Sources Using Artificial Neural Networks) // Defectoscopiya. 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/matecconf/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 konstruktsiy (Acoustic-Emission Diagnostics of Structures). Moscow: Radio i Svyaz, 2000. P. 92—112.
-

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ СФ И DMAS ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЕЙ, ВОССТАНОВЛЕННОГО ПО ЭХОСИГНАЛАМ, ИЗМЕРЕННЫМ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ

© 2024 г. Е.Г. Базулин^{1,*}

¹ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»,
Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк «Строгино»
**E-mail: bazulin@echoplus.ru*

Поступила 28.09.2024; после доработки 24.10.2024
Принята к публикации 24.10.2024

Достоверность и чувствительность ультразвукового контроля определяется уровнем шума изображения отражателей и его разрешающей способностью. Применение СF- или DMAS-технологий в различных сочетаниях перспективно, так как эти технологии достаточно простые, практически не требуют дополнительных вычислительных ресурсов, применяются к эхосигналам, измеренным обычными дефектоскопами, работающими с антенными решетками. В численных и модельных экспериментах продемонстрировано, что применение этих методов позволяет повысить разрешающую способность изображения отражателей более чем в два раза и уменьшить уровень шума более чем на 20 дБ. В численном эксперименте показано, что фазовые искажения из-за комплексных коэффициентов преломления и отражения приводят к тому, что даже при точно известных параметрах опыта при работе на прямом луче на поперечной волне индикация вершины трещины может сместиться от своего истинного положения примерно на длину волны. Для решения задач дефектометрии это очень большая ошибка. Но если при восстановлении изображения отражателей проводить коррекцию фазы, то индикация вершины трещины совпадает со своим реальным положением. СF- и DMAS-технологии показали свою работоспособность и при работе с зашумленными эхосигналами.

Ключевые слова: антенная решетка, Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM), цифровая фокусировка апертуры (ЦФА), антенная матрица, когерентный фактор (CF), Delay Multiply and Sum beamforming (DMAS).

APPLICATION OF CF AND DMAS TECHNOLOGY TO IMPROVE THE QUALITY OF REFLECTOR IMAGES RECONSTRUCTED FROM ECHOES MEASURED BY AN ANTENNA ARRAY

© 2024 Е.Г. Bazulin^{1,*}

¹ECHO+ Research and Production Center LLC
Russia 123458 Moscow, Tvardovsky str., 8, Strogino Technopark
*E-mail: *bazulin@echoplus.ru*

Reliability and sensitivity of ultrasonic control is determined by the noise level of the reflector image and its resolution. Application of CF- or DMAS-technology in various combinations is promising, as these technologies are simple enough, practically do not require additional computational resources, are applied to echo signals measured by conventional flaw detectors working with antenna arrays. In numerical and model experiments it is demonstrated that the application of these methods allows to increase the resolution of reflector images more than twice and to reduce the noise level by more than 20 dB. In the numerical experiment it is shown that phase distortions due to complex refractive and reflection coefficients lead to the fact that even with precisely known parameters of the experiment when working on a direct beam on a transverse wave the indication of the crack tip can shift from its true position by about a wavelength. For the solution of defectometry tasks this is a very large error. But, if phase correction is performed when reconstructing the reflector image, the crack tip indication coincides with its real position. CF- and DMAS-technologies have shown their workability also when working with noisy echoes.

Keywords: antenna array, Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM), digital aperture focusing (DAF), antenna array, coherent factor (CF), Delay Multiply and Sum beamforming (DMAS).

DOI: 10.31857/S0130308224120029

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при проведении ультразвукового контроля с применением пьезоэлектрических антенных решеток широко используются две технологии восстановления изображения отражателей: технология фокусировки антенной решеткой (ФАР) [1] и технология цифровой фокусировки апертуры (ЦФА) [2]. В работе [3] обе технологии сравниваются, и делается вывод о том, что ЦФА-технология более перспективна в плане применения разнообразных алгоритмов восстановления изображения отражателей. Метод ЦФА позволяет восстановить изображе-

ния отражателей со сплошной фокусировкой во всех точках области восстановления изображения (ОВИ). На первом этапе регистрируются эхосигналы для всех комбинаций излучатель—приемник элементов антенной решетки (режим Full Matrix Capture [4]). Набор эхосигналов при излучении одним элементом антенной решетки и регистрацией всеми элементами называется выстрелом. Набор эхосигналов, состоящий из всех выстрелов, будем называть залпом. На втором этапе по измеренным эхосигналам методом комбинационного SAFT (C-SAFT) [5, 6] восстанавливается изображение отражателей с учетом эффекта трансформации типа волны при многократном отражении импульсов от границ объекта контроля. Метод C-SAFT в англоязычной литературе, посвященной ультразвуковому контролю, называется Total Focusing Method (TFM) [7]. Строго говоря, метод C-SAFT и TFM — это разные методы, позволяющие получить изображения с использованием разной техники расчетов, но дающие очень близкие по качеству изображения отражателей [8].

При восстановлении изображений отражателей по ФАР-технологии обычно используется фиксированный фокус при излучении и динамический фокус при приеме, что позволяет получать изображения с частотой кадров в десятки Герц [9]. Одним из самых ранних способов формирования луча является задержка эхосигнала каждого элемента антенной решетки и их суммирование (Delay and Sum beamforming (DAS)). Возможности метода DAS по улучшению разрешения изображения и подавлению помех ограничены. В работе [10] был предложен метод Delay Multiply and Sum beamforming (DMAS), основанный на корреляции измеренных эхосигналов. В отличие от DAS, метод DMAS является нелинейным, в котором эхосигналы сдвигаются во времени и умножаются перед суммированием, т.е. для разных пар эхосигналов выполняется операция корреляции. Поскольку DMAS умножает эхосигналы, в выходном спектре появляются составляющие второй гармоники, для удаления которой можно добавить полосовой фильтр. Метод DMAS с добавлением фильтрации обозначается как F-DMAS. По сравнению с методом DAS, DMAS лучше подавляет шум за счет операции корреляции, а увеличение числа сигналов при суммировании должно повысить фронтальную разрешающую способность, так как повышается точность оценки степени когерентности выборки. Метод DMAS можно применять и при формировании изображения по технологии ЦФА.

Еще одно из направлений повышения качества изображения отражателей, т.е. уменьшения уровня шума и повышения разрешающей способности, основано на расчете когерентного фактора (Coherence Factor (CF)) [11, 12], который определяется как отношение между когерентной энергией принятого сигнала и его полной энергией (некогерентной). Используя CF для взвешивания результатов формирования луча, можно подавить «боковые лепестки» и уменьшить ширину «основного лепестка». Когерентный фактор и его разные модификации [13—16] используются и в ФАР-, и ЦФА-технологиях. Методы DMAS и CF, предназначенные для повышения качества определения когерентности набора чисел, с вычислительной точки зрения являются достаточно простыми методами.

Отметим, что существуют и более тяжелые с вычислительной точки зрения методы повышения качества изображения: метод Кейпона [17], метод максимальной энтропии [18], метод распознавания со сжатием (Compressive Sensing (CS)) [19, 20] и другие. В связи с развитием нейронных сетей появились публикации, посвященные их применению для повышения качества изображения отражателей [21, 22]. Применение этих методов позволяет получать изображения со сверхразрешением и значительно уменьшить уровень шума, в частности уровень «боковых лепестков», но эти методы применяются при постобработке эхосигналов.

Целью данного исследования являлось изучение возможности повышения разрешающей способности и уменьшения уровня шума изображения отражателей с использованием методов DMAS и CF, которые не требуют значительных вычислительных ресурсов, при проведении ультразвукового неразрушающего контроля.

2. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

2.1. Метод ЦФА

При использовании антенной решетки из N_e элементов эхосигналы, измеренные в режиме FMC, обозначим как $p_{m,n}(t; \mathbf{r}_w)$, где m — номер излучающего элемента; n — номер приемного элемента антенной решетки; \mathbf{r}_w — координаты передней грани призмы, так как для формирования изображения можно использовать эхосигналы, измеренные в разных положениях решетки. Изображение отражателей, восстановленное методом TFM, можно записать как

$$I_S(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w) = \sum_{m=1}^{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} p_{m,n}(t - t_{m,n}(\mathbf{r}_i; as) + t_{\max}; \mathbf{r}_w), \quad (1)$$

где t_{\max} — время нарастания импульса; $t_{m,n}(\mathbf{r}_i; as)$ — время пробега импульса от излучателя до точки \mathbf{r}_i и к приемнику для заданной акустической схемы as . Под акустической схемой будем подразумевать описание лучевой траектории распространения импульса от излучателя до отражателя и до приемника при отражении импульса от неровных границ объекта контроля. Акустическая схема будет определяться последовательностью букв L (продольная волна), T (вертикально поляризованная поперечная волна) и буквы d (отражение от несплошности). Например, запись TTdT означает работу с поперечной волной с одним отражением от дна при излучении и приеме, а запись TdTL — работу в режиме «самотандем» [23]. Расчет времени задержки $t_{m,n}(\mathbf{r}_i; as)$ для случая однородной изотропной среды является тривиальной задачей, которую можно решить с использованием принципа Ферма или с помощью трассировки лучей.

Смысл формулы (1) заключается в том, из эхосигналов залпа делается выборка $\{p\} = \{\{p_{1,n}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)\}, \{p_{2,n}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)\}, \dots, \{p_{N_e,n}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)\}\} = \{\{p_{m,n}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)\}_{n=1}^{N_e}\}_{m=1}^{N_e}$ длиной $N_e \times N_e$. Сумма всех элементов выборки $\{p\}$ — это простейший способ определить степень ее когерентности, что и отражено в формуле (1). Если в точке \mathbf{r}_i есть отражатель, то все элементы выборки $\{p\}$ имеют значительную амплитуду и примерно одинаковую фазу и поэтому значение изображения $I(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)$ согласно (1) будет большим. Если отражатель расположен рядом с точкой \mathbf{r}_i , то выборка будет состоять из чисел меньшей амплитуды и не в фазе, что приведет к уменьшению суммы. Если же отражателя в окрестности точки \mathbf{r}_i нет, то в случае белого шума сумма выборки $\{p\}$ будет стремиться к нулю при увеличении N_e . Нижний индекс S для переменной $I_S(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)$ означает, что выборка $\{p\}$ суммируется. Применение более эффективного критерия когерентности выборки $\{p\}$ должна позволить повысить качество изображения.

Сформировать изображение отражателей можно и альтернативным способом. Обозначим через $\{p_m\} = \{p_{m,1}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w), p_{m,2}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w), \dots, p_{N_e,1}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)\} = \{p_{m,n}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)\}_{n=1}^{N_e}$ выборку длиной N_e значений эхосигналов, выбранных из выстрела номер m по задержкам, рассчитанных для точки изображения \mathbf{r}_i по выбранной акустической схеме as . Их сумма

$$I_S^m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w) = \sum_{n=1}^{N_e} p_{m,n}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w) \quad (2)$$

позволит получить изображение методом TFM для точки i по эхосигналам выстрела m . Тогда обычное ЦФА-изображение можно получить, попиксельно сложив когерентно все изображения по выстрелам:

$$I_{S,S}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w) = \sum_{m=1}^{N_e} I_S^m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w). \quad (3)$$

Изображения, полученные по формулам (1) и (3), будут одинаковы, т.е. $I_S(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w) \equiv I_{S,S}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)$, но расчет этих изображений проводится разным образом и это позволяет применить разные способы оценки когерентности последовательности. В формуле (3) оценивается когерентность выборки для каждой точки \mathbf{r}_i :

$$\{I^m\} = \{I_S^m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)\}_{m=1}^{N_e}. \quad (4)$$

При сканировании антенной решетки по N_p положениям итоговое изображение отражателей можно получить как сумму N_p изображений $I_{S,S}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_{w,p})$, восстановленных для каждого положения p антенной решетки или матрицы по формуле:

$$I_{S,S,S}(\mathbf{r}_i; as) = \sum_{p=1}^{N_p} I_{S,S}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_{w,p}) = \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{m=1}^{N_e} I_S^m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w), \quad (5)$$

когда оценивается когерентность выборки $\{I_S(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_{w,p})\}_{p=1}^{N_p}$ длиной N_p . Если призма перемещается вдоль оси x , то изображение $I_{S,S,S}(\mathbf{r}_i; as)$ будем называть ЦФА-Х-изображением.

Таким образом, формирование изображения можно рассматривать как процесс определения степени когерентности набора чисел, по которому определяется наличие отражателей в заданной точке ОВИ. Выбор размеров выборки или выборок и варианты их определения достаточно разнообразен (табл. 1). С одной стороны, можно оценивать когерентность выборки

$\{p\} = \left\{ \left\{ p_{m,n}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_{w,p}) \right\}_{n=1}^{N_e} \right\}_{m=1}^{N_p}$ максимально большой длины $N_e \times N_e \times N_p$. Для антенной решетки с $N_e = 32$ для 10 положений измерений эхосигналов N_p длина выборки равна 10240. С другой стороны, можно восстановить повыстрельные изображения $I_S^m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)$ по короткой выборке $\{p_m\} = \{p_{m,n}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)\}_{n=1}^{N_e}$ длиной N_e , а затем по выборке $\{I^m\} = \{I_S^m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)\}_{m=1}^{N_p}$ длиной N_p восстановить изображение для одного положения решетки и, наконец, сформировать итоговое изображение $I_{S,S,S}(\mathbf{r}_i; as)$ по выборке $\{I_S(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_{w,p})\}_{p=1}^{N_p}$ длиной N_p . Возможен один из промежуточных вариантов, когда итоговое изображение $I_{S,S,S}(\mathbf{r}_i; as)$ формируется не по изображениям $I_{S,S}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)$, а по выборке $\{I\} = \{I_S^m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_{w,p})\}_{m=1}^{N_p}$ длиной $N_e \times N_p$. Если для оценки когерентности используется линейная операция сумма, то итоговое изображение не зависит от способа формирования выборки или нескольких выборок для оценки их когерентности. Самый простой способ восстановить изображение отражателей — это воспользоваться формулой (5).

2.2. Когерентный фактор

В работе [24] когерентный фактор (Coherence factor (CF)) использовался как количественная метрика для оценки качества изображения. В частности, CF для выборки $\{s\}$ длиной N рассчитывается как отношение суммы когерентных сигналов к сумме некогерентных сигналов:

$$\widehat{\text{CF}} = \left| \sum_{i=1}^N s_i \right|^2 / \left(\sum_{i=1}^N |s_i|^2 \right). \quad (6)$$

Некогерентная сумма в знаменателе не подвержена фазовым искажениям, так как модуль сигнала возводится в квадрат и суммируется. В работе [25] предложен вариант когерентного фактора в виде:

$$\text{CF} = 1 - \sqrt{1 - \left(\left| \sum_{i=1}^N s_i \right| / \left(\sum_{i=1}^N |s_i| \right) \right)^2}. \quad (7)$$

Значение $\widehat{\text{CF}}$ и CF принадлежат интервалу $[0, 1]$. Важнейшее свойство CF при анализе выборок $\{p\}$ эхосигналов в том, что там, где расположен отражатель, он равен 1 независимо от силы отражателя. Но такая ситуация возможна только в том случае, если шум выборки нулевой и эхосигналы не пересекаются. Это свойство CF позволяет формировать изображение как произведение ЦФА-изображения на CF-изображения.

Еще используется знаковый когерентный фактор (Sign coherence factor (SCF)) выборки $\{s\}$ длиной N , который рассчитывается подобно формуле (7):

$$\text{SCF} = 1 - \sqrt{1 - \left(\left(\sum_{i=1}^N \text{sign}(s_i) \right) / N \right)^2}, \quad (8)$$

где sign — стандартная функция выделения знака числа. Значение SCF также принадлежит интервалу $[0, 1]$. Существуют еще варианты расчета когерентности: в работах [26, 27] рассматриваются фазовой когерентный фактор (Phase coherence factor (PCF)), векторный когерентный фактор (Vector coherence factor (VCF)) и круговой фактор когерентности (Circular coherence factor (CCF)).

Рассчитывать когерентный фактор CF можно на разных этапах формирования изображения, как описано в разделе 2.1. Расчет CF лучше проводить не выборки $\{p\}$, а выборки согласно (4), когда уровень шума меньше и индикации отражателей меньше пересекаются друг с другом.

2.3. Технология DMAS

Метод DMAS был разработан для повышения качества ФАР-изображений и заключался в следующем. Если имеется набор чисел $\{p_n\}_{n=1}^{N_e}$, то можно его увеличить следующим образом.

На диагональ квадратной матрицы $N_e \times N_e$ помещается набор чисел $\{p_n\}_{n=1}^{N_e}$:

$$\mathbf{M}_{\text{DMAS}} = \begin{vmatrix} p_1 & & & & \\ s_{21} & p_2 & & & \\ s_{31} & s_{32} & p_3 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \\ s_{N_e 1} & s_{N_e 2} & s_{N_e 3} & \cdots & p_{N_e} \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Элементы нижнего треугольника для чисел реального формата формируются по формуле:

$$s_{ij} = \text{sign}(p_i)\text{sign}(p_j)\sqrt{\text{abs}(p_i)\text{abs}(p_j)}. \quad (10)$$

Для комплексных чисел формула (10) обобщается в среднее геометрическое двух чисел:

$$s_{ij} = e^{\frac{i(\phi_i + \phi_j)}{2}} \sqrt{\text{abs}(p_i)\text{abs}(p_j)} = \sqrt{p_i p_j}. \quad (11)$$

Из нижнего треугольника матрицы \mathbf{M}_{DMAS} составляется список $\{p_{\text{DMAS}}\}$. Операцию формирования нового набора обозначим как DMAS, т.е. $\{p_{\text{DMAS}}\} = \text{DMAS}\{p\}$. Такой подход приводит к тому, что вместо набора чисел длиной для суммирования N_e можно работать со списком $\{p_{\text{DMAS}}\}$ длиной $N_{\text{DMAS}} = N_e(N_e+1)/2$. Существенно большая длина выборки позволяет эффективнее оценивать ее когерентность либо простой суммой, либо с использованием когерентного фактора или иными способами.

2.4. Метод ЦФА с учетом DMAS и CF

В данной работе для формирования изображения отражателей будут рассматриваться выборки, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

	Выборка	Длина выборки
1.	$\{p_m\} = \{p_{m,n}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)\}_{n=1}^{N_e}$, используется для расчета повышательных изображений $I_S^m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)$	N_e
2.	$\{I^m\} = \{I_S^m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)\}_{m=1}^{N_e}$, используется для расчета изображения $I_{S,S}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_{w,p})$ в одном положении решетки	N_e
3.	$\{I^p\} = \{I_S(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_{w,p})\}_{p=1}^{N_p}$, используется для расчета итогового изображения $I_{S,S,S}(\mathbf{r}_i; as)$	N_p
4.	$\{\{I^m\}^p\} = \{I_S(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_{w,p})\}_{p=1}^{N_p} = \{\{I_S^m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)\}_{m=1}^{N_e}\}_{p=1}^{N_p}$, используется для расчета итогового изображения $I_{S,S,S}(\mathbf{r}_i; as)$	$N_e \times N_p$

Несколько типов выборок и операций создает определенные трудности для описания алгоритма восстановления изображения отражателей в рамках оценки когерентности выборок разного типа. Описание алгоритма получения изображения будет представлять собой список способов определения когерентности выборок, определенных в табл. 1. При оценке когерентности выборки с помощью операции сумма S по формуле (5) последовательность операций можно записать следующим образом:

$$I_{S,S,S} = \left\{ S\left(\{p^m\}\right), S\left(\{I^m\}\right), S\left(\{I^p\}\right) \right\} \equiv \left\{ S\left(\{p^m\}\right), S\left(\{\{I^m\}^p\}\right) \right\}. \quad (12)$$

Если при формировании повышательных изображений $I_S^m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)$ будет использоваться операция DMAS и суммирование S , то итоговое изображение можно будет получить таким образом:

$$I_{\text{DMAS},S,S} = \left\{ S\left(\text{DMAS}\left(\{p^m\}\right)\right), \left(S\left\{I^m\right\}, S\left\{I^p\right\}\right) \right\}. \quad (13)$$

Итоговое изображение можно вычислить так:

$$I_{S, \text{DMAS-DMAS}} = \left\{ S\left(\{p^m\}\right), S\left(\text{DMAS}\left(\left\{\left\{I^m\right\}^p\right\}\right)\right) \right\} \quad (14)$$

или по формуле:

$$I_{\text{DMAS,DMAS-DMAS}} = \left\{ S\left(\text{DMAS}\left(\{p^m\}\right)\right), S\left(\text{DMAS}\left(\left\{\left\{I^m\right\}^p\right\}\right)\right) \right\}. \quad (15)$$

Изображение самого низкого качества можно получить по формуле (12), а самого высокого — по формуле (15). Отметим, что в общем случае справедливо неравенство:

$$S\left(\text{DMAS}\left(\left\{\left\{I^m\right\}^p\right\}\right)\right) \neq \left\{ S\left(\text{DMAS}\left(\{I^m\}\right)\right), S\left(\text{DMAS}\left(I^p\right)\right) \right\},$$

причем левая часть неравенства обеспечивает лучший результат оценки когерентности, так как длина выборки перед операцией DMAS будет равна $N_e \times N_p$.

Если операцию CF применить к множеству парциальных изображений $I_S^m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)$, то можно получить CF-изображение отражателей для одного положения антенной решетки. Каждый пиксель будет рассчитываться по формуле (7), а его значение будет лежать в интервале $[0, 1]$:

$$I_{\text{CF}}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w) = \text{CF}_{m=1}^{N_e}(I_S^m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)) = \text{CF}_{m=1}^{N_e}\left(\left\{I^m\right\}\right). \quad (16)$$

Результат умножения ЦФА-изображения на CF-изображение можно рассматривать как результат восстановления изображения отражателей:

$$I_{S \times \text{CF}}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w) = I_S(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w) \cdot I_{\text{CF}}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w), \quad (17)$$

обладающий более высокой разрешающей способностью и меньшим уровнем шума [15]. Понятно, что CF можно находить не только по исходной выборке, но и по выборке, полученной с помощью операции DMAS.

Итоговое CF-изображение отражателей для N_p положений антенной решетки можно получить так:

$$I_{\text{CF}}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w) = \text{CF}\left(\left\{\left\{I_S^m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)\right\}_{m=1}^{N_e}\right\}_{p=1}^{N_p}\right) = \text{CF}\left(\left\{\left\{I^m\right\}^p\right\}\right). \quad (18)$$

Если операцию DMAS применить к выборке $\left\{\left\{I^m\right\}^p\right\}$, итоговое CF-изображение отражателей для N_p положений антенной решетки можно расчитать по формуле:

$$I_{\text{CF,DMAS-DMAS}}(\mathbf{r}_i; as) = \text{CF}\left(\text{DMAS}\left(\left\{\left\{I^m\right\}^p\right\}\right)\right). \quad (19)$$

Таким образом, применение операции DMAS и операции CF по формуле (7) в различных сочетаниях должно позволить получить изображение более высокого качества для анализа.

В статье [28] предлагается подобный подход, использующий комбинации обработок DMAS и CF, но для медицинской диагностики. Существует метод фазово-когерентной визуализации (Phase coherence imaging (PCI)) [29], основанный на расчете SCF реальной и мнимой частей

выборок $\{p\} = \left\{\left\{p_{m,n}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)\right\}_{n=1}^{N_e}\right\}_{m=1}^{N_e}$ и расчете ее модуля как нормы L_∞ .

3. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проведения численных экспериментов использовались эхосигналы, рассчитанные с помощью теории лучевых трубок в программе CIVA [30].

3.1. Модель придонной трещины высотой 5 мм

Объект контроля представлял собой параллелепипед толщиной 20 мм из однородного изотропного материала со свойствами стали. Придонная трещина высотой 5 мм была расположена

в точке $x = 0$ мм. Эхосигналы рассчитывались в приближении Кирхгофа и теории геометрической дифракции для случая одного отражения от границ объекта контроля с учетом трансформации типа волны. Антennaя решетка с частотой 5 МГц состояла из 32 элементов размерами $0,75 \times 5$ мм с зазором 0,25 мм и размещалась на рексолитовой призме с углом наклона 35 град. По оси x antennaя решетка перемещалась $N_p = 15$ раз с шагом 5 мм, начиная с положения с -50 мм. В данном разделе восстанавливались изображения с обработкой всех эхосигналов по всем 15 положениям (метод X-ЦФА).

На рис. 1 a показано обычное изображение $I_{S,S,S}$, восстановленное по акустической схеме TdT по формуле (12). Хорошо видна индикация вершины трещины, но индикация ее корня имеет сложную структуру, так как она сформирована многими отраженными от корня трещины импульсами по разным акустическим схемам. Оценить высоту трещины по такому изображению достаточно сложно. На рис. 1 b показано изображение $I_{S, DMAS-DMAS}$, восстановленное по формуле (14). Запись DMAS—DMAS означает, что начальная выборка (см. табл. 1, строка 4) длиной $N_e N_p = 480$ после операции DMAS увеличилась свою длину до 114 960. Это привело к уменьшению уровня шума примерно на 12 дБ. На рис. 1 b показано $I_{S,S-S} \times I_{CF}$ -изображение. Запись $S-S$ означает, что рассчитывался когерентный фактор массива длиной $N_e N_p = 640$. Изображения на рис. 1 b, b в целом похожи друга на друга и на обоих виден эффект смещения индикации вершины трещины вверх примерно на 0,5 мм, а это около длины волны на поперечной волне. Этот эффект связан с тем, что при восстановлении изображения на поперечной волне не учитывается изменение фазы импульса при преломлении на границе призма—образец за первым критическим углом и при отражении за третьим критическим от дна. Как известно [31], фаза преломленной поперечной волны и отраженной поперечной волны не меняется только при угле 45 град, но до 45 и после 45 град фаза меняется сложным образом в зависимости от угла преломления или отражения. При работе с antennaями решетками, каждый элемент которой имеет широкую диаграмму направленности, ЦФА-изображение в точке r_i будет формироваться лучами в широком диапазоне преломленных лучей. Так как фаза импульса зависит от угла преломления, то это приведет к смещению индикации, которое будет зависеть от скорости измерения фазы от угла преломления. При работе с лучами в области 45 ± 5 град этот эффект будет практически незамечен, но для случая работы в диапазоне 52 ± 20 град, характерном для данного численного эксперимента, индикация отражателя на ЦФА-изображении будет смещаться. Таким образом, даже при точно известных параметрах численного эксперимента высота трещины оказалась завышенной примерно на 0,5 мм. При решении задач дефектометрии это недопустимо очень большая ошибка.

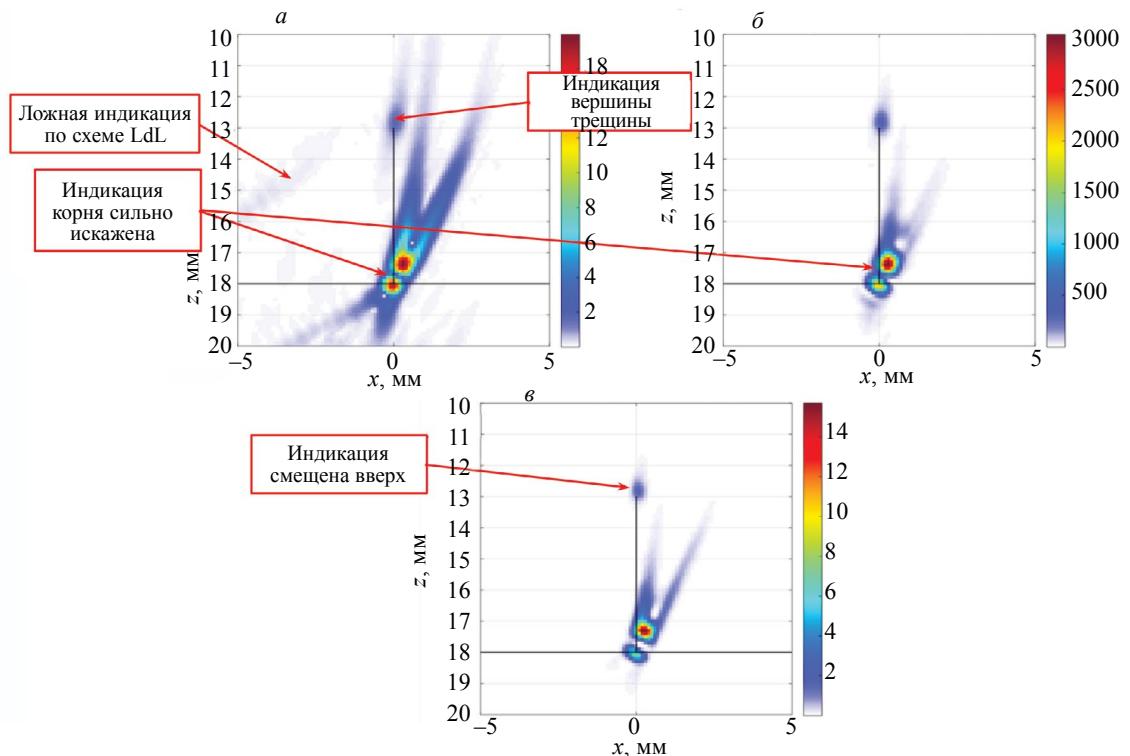


Рис. 1. Изображения придонной трещины, восстановленные по акустической схеме TdT: $I_{S,S-S}$ (a); $I_{S, DMAS-DMAS}$ (b); $I_{S,S-S} \times I_{CF}$ (c).

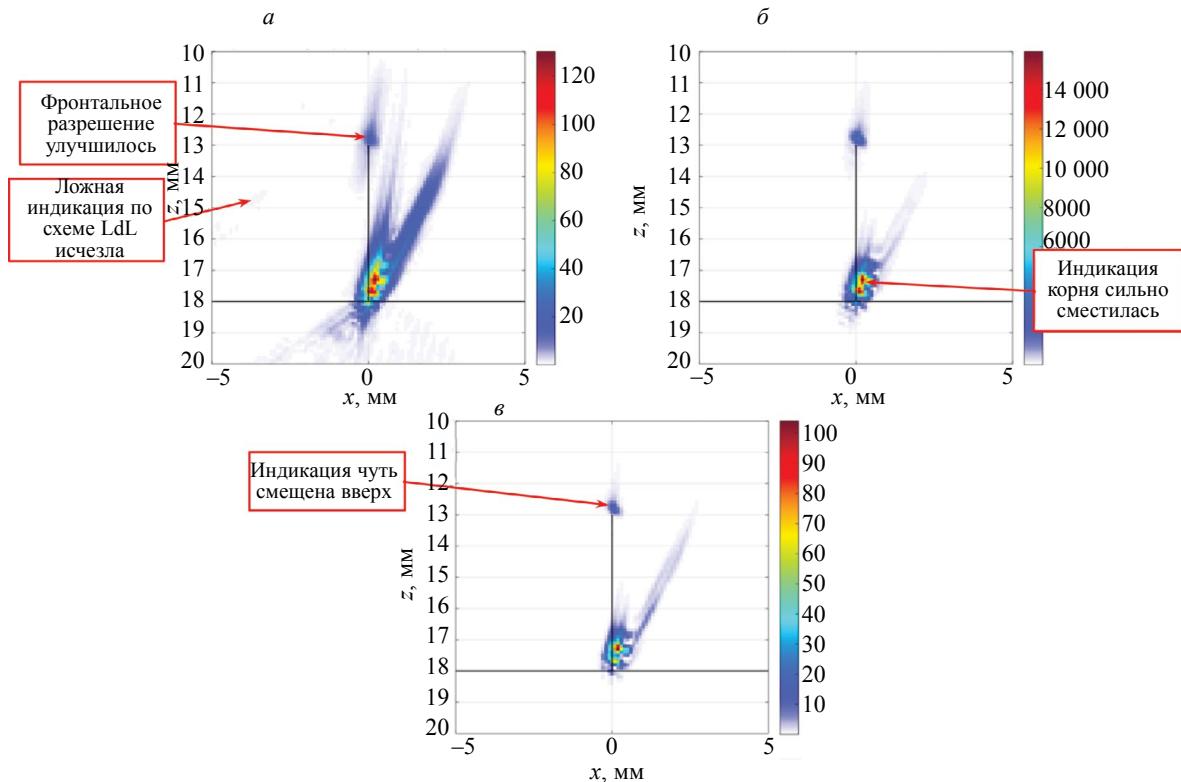


Рис. 2. Изображения придонной трещины, восстановленные по акустической схеме TdT: $I_{\text{DMAS}, S-S}$ (а); $I_{\text{DMAS-DMAS}}$ (б); $I_{\text{DMAS,S-S}} \times I_{\text{CF}}$ (в).

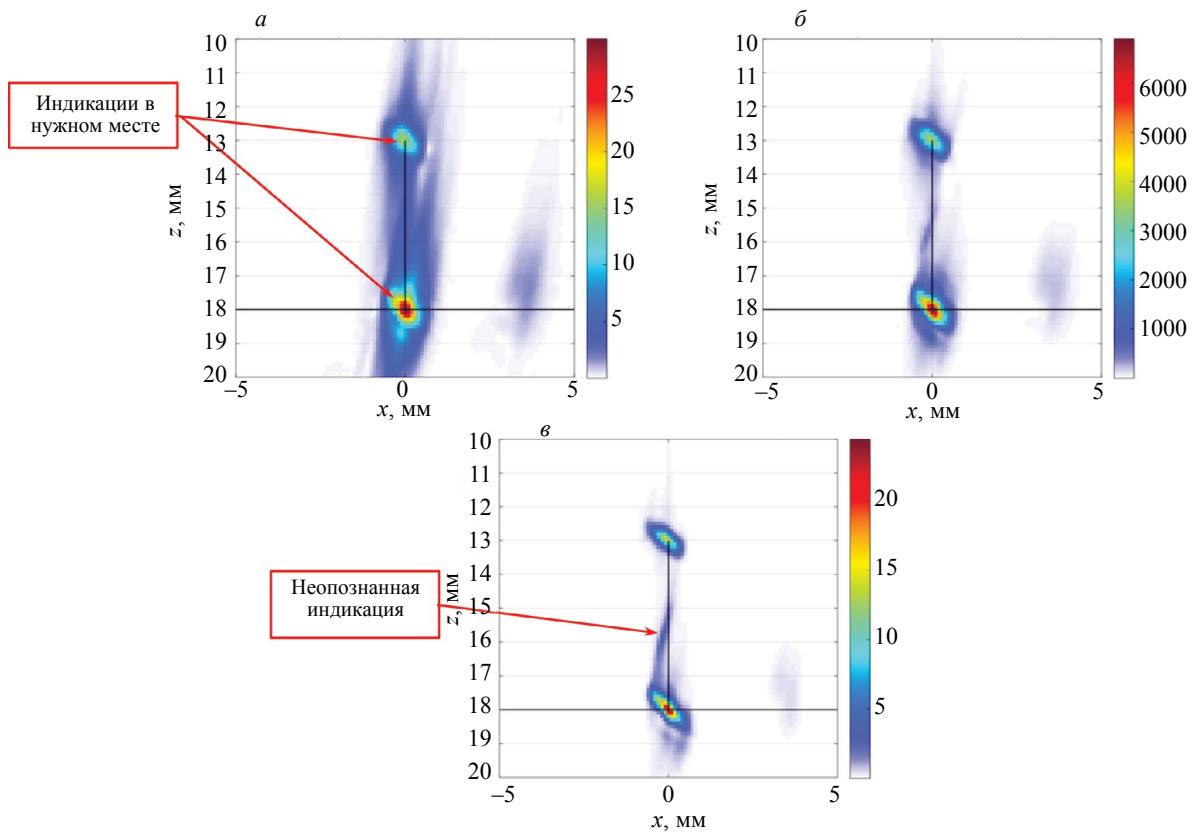


Рис. 3. Изображения придонной трещины, восстановленные по акустической схеме LdL: $I_{S, S-S}$ (а); $I_{S, \text{DMAS-DMAS}}$ (б); $I_{S, \text{DMAS-S}} \times I_{\text{CF}}$ (в).

На рис. 2 показаны изображения, подобные рис. 1, только с той разницей, что при формировании повышательных изображений длина выборки p_m с 32 при помощи операции DMAS, согласно формуле (13), была увеличена более чем в десять раз — до 496. Это привело примерно к двукратному повышению фронтальной разрешающей способности, благодаря чему смещение индикации вершины трещины стало очевидным.

Изображения, аналогичные тем, что представлены на рис. 1, но восстановленные по акустической схеме LdL, показаны на рис. 3. Так как фазовые искажения из-за преломления на границе призма—образец отсутствуют, то индикация вершины трещины точнее соответствует своему истинному положению. Индикация корня трещины из-за того, что она сформирована импульсами в основном по схеме LdL, позволяет точнее, чем на рис. 2, определить координату корня трещины. Поэтому по рис. 3 ε высота трещины определяется с меньшей ошибкой. По сравнению с обычным $I_{S,S-S}$ -изображением на рис. 3 a , фронтальная разрешающая способность $I_{S,DMAS-DMAS}$ -изображения на рис. 3 b возросла примерно в полтора раза, а уровень «боковых лепестков» индикаций уменьшился. Фронтальная разрешающая способность $I_{S,DMAS-DMAS} \times I_{CF}$ -изображения на рис. 3 c возросла еще больше — примерно в два раза. Кроме того, на рис. 3 c стала заметна индикация, природа которой, возможно, связана с особенностью работы программы CIVA при расчете эхосигналов в приближении Кирхгофа.

На рис. 4 показаны изображения, подобные тем, что приведены на рис. 1, но с коррекцией фазовых искажений, согласно статье [32]. Принципиальная разница между этими двумя изображениями в том, что индикация вершины трещины стала соответствовать ее реальному положению, как было при восстановлении изображений на продольной волне (см. рис. 3). Таким образом для повышения точности решения задачи определения высоты трещины при работе на поперечных волнах (TdT) необходимо корректировать фазовые искажения. При работе с одним и более отражениями от границ образца коррекция фазовых искажений становится необходимой для того, чтобы индикации точно соответствовали реальным положениям границы отражателя.

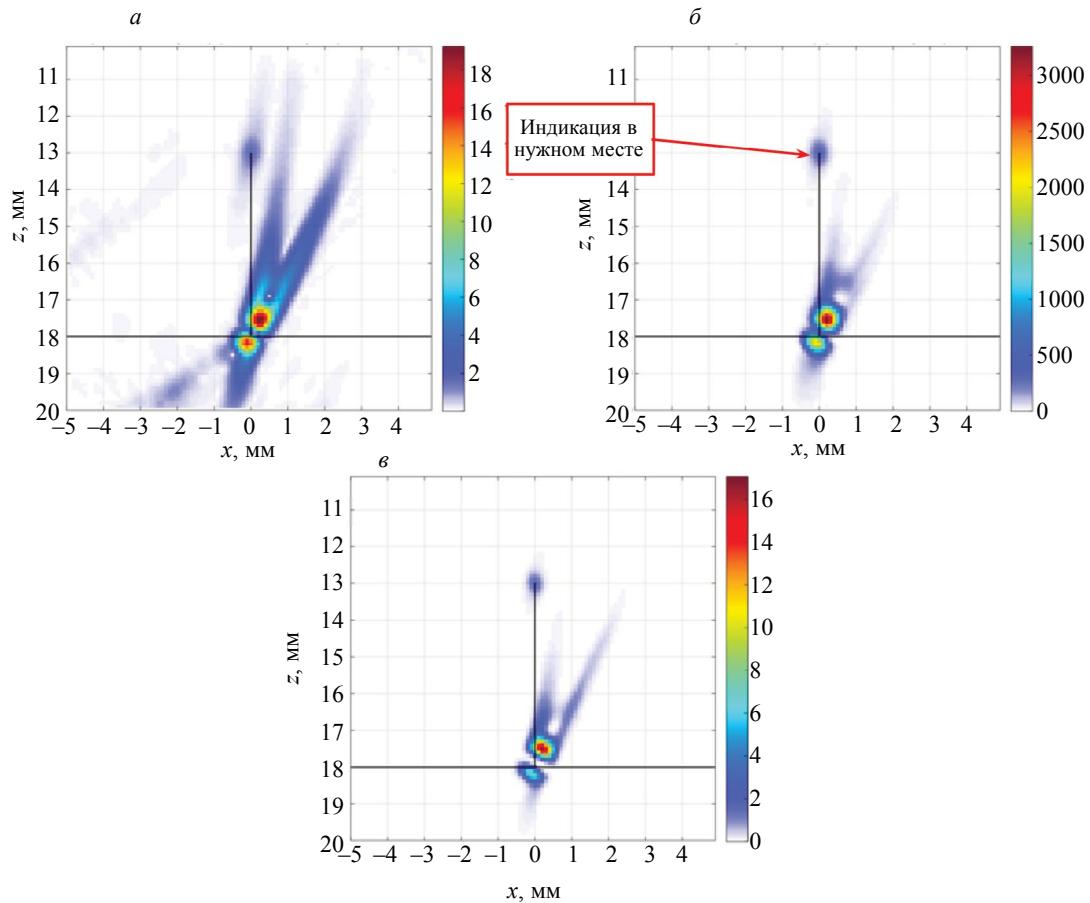


Рис. 4. Изображения придонной трещины, восстановленные по акустической схеме TdT с коррекцией фазовых искажений: $I_{S,S-S}$ (a); $I_{S,DMAS-DMAS}$ (b); $I_{S,S-S} \times I_{CF}$ (c).

4. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Модельные эксперименты проводились с использованием дефектоскопа «АВГУР АРТ», разработанного и изготовленного в «Научно-производственном центре «ЭХО+» [33].

4.1. Модель висячей трещины высотой 3 мм

Для создания модели вертикальной висячей трещины высотой около 3 мм в стальном блоке было просверлено сквозное отверстие, блок нагревался до 1000 град и сжимался до полного схлопывания отверстия. Трещина была расположена в точке $x = 0$ мм. Эхосигналы регистрировались антенной решеткой с частотой 5 МГц из 32 элементов размерами $0,75 \times 10$ мм с зазором 0,05 мм, установленной на рексолитовую призму с углом наклона 35 град, передняя грань которой имела координаты $x = -4$ мм.

На рис. 5 a показано ЦФА-изображение трещины по акустической схеме TdT (в принятых обозначениях $I_{S,S}$ -изображение, согласно (3)). Две буквы в обозначении изображения отражают тот факт, что измерения эхосигналов проводились в одной точке, согласно формуле (3). Видны индикации краев трещины на фоне шума достаточно высокого уровня. На рис. 5 b показано $I_{S,DMAS}$ -изображение, на котором уровень шума уменьшился примерно на 10 дБ.

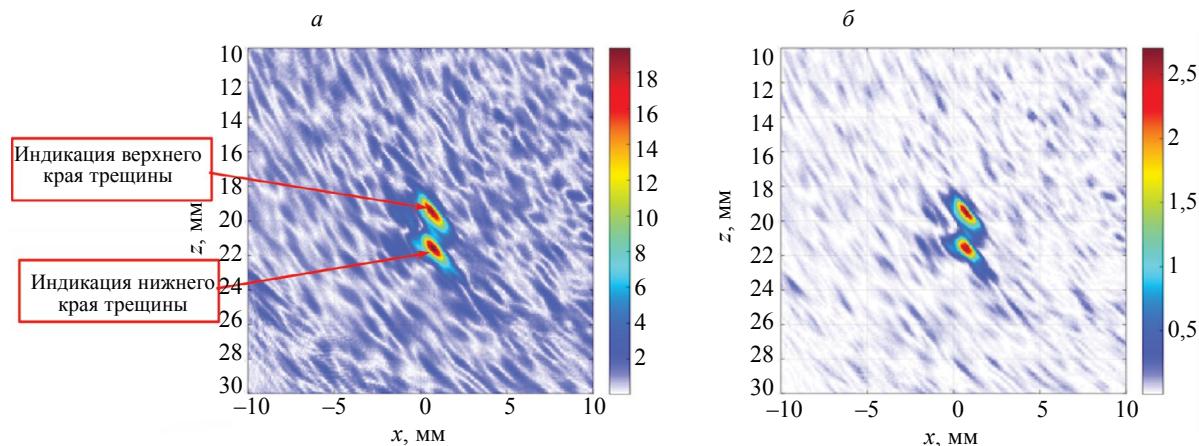


Рис. 5. Изображения висячей трещины, восстановленные по акустической схеме TdT: $I_{S,S}$ (a); $I_{S,DMAS}$ (b).

На рис. 6 a показано $I_{DMAS,S}$ -изображение трещины по акустической схеме TdT, а на рис. 6 b показано $I_{DMAS,DMAS}$ -изображение, на котором уровень шума по сравнению с ЦФА-изображением на рис. 5 a уменьшился примерно на 20 дБ, а фронтальная разрешающая способность возросла примерно в два раза.

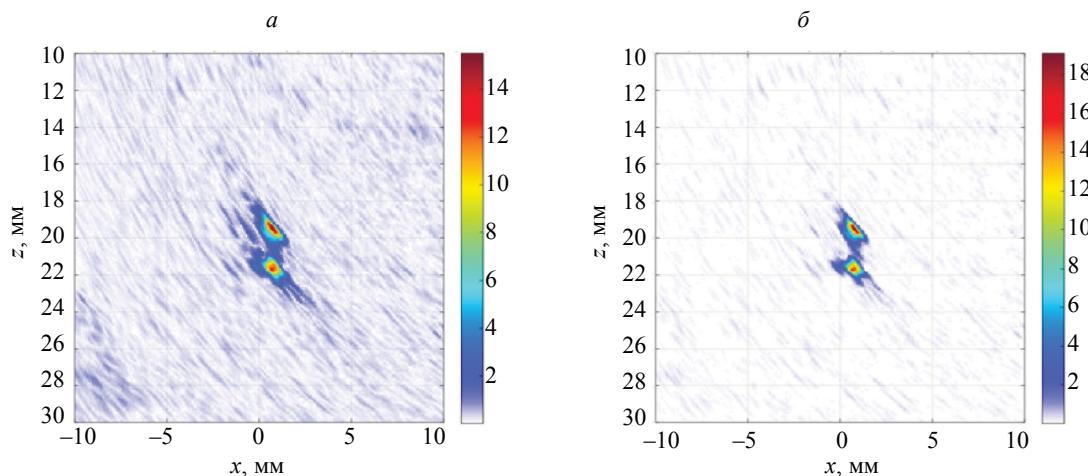


Рис. 6. Изображения висячей трещины, восстановленные по акустической схеме TdT: $I_{DMAS,S}$ (a); $I_{DMAS,DMAS}$ (b).

4.2. Два БЦО диаметром 2 мм

В стальном образце были просверлены два БЦО диаметром 2 мм на глубинах 14 и 18 мм. Центры БЦО расположены в точке $x = 1,5$ мм. Эхосигналы регистрировались антенной решеткой с частотой 5 МГц из 32 элементов размерами $0,75 \times 10$ мм с зазором 0,25 мм, установленной на рексолитовую призму с углом наклона 35 град, передняя грань которой имела координаты $x = -5$ мм.

На рис. 7 a показано $I_{S,S}$ -изображение двух БЦО по акустической схеме ТdТ. Контуры образца показаны на рисунке линиями черного цвета. Хорошо видны индикации границ БЦО на прямом и отраженном луче, а также ложные индикации, сформированные рэлеевским импульсом обегания—соскальзывания. На рис. 7 b показано $I_{S,DMAS}$ -изображение, на котором уровень шума уменьшился примерно на 9 дБ.

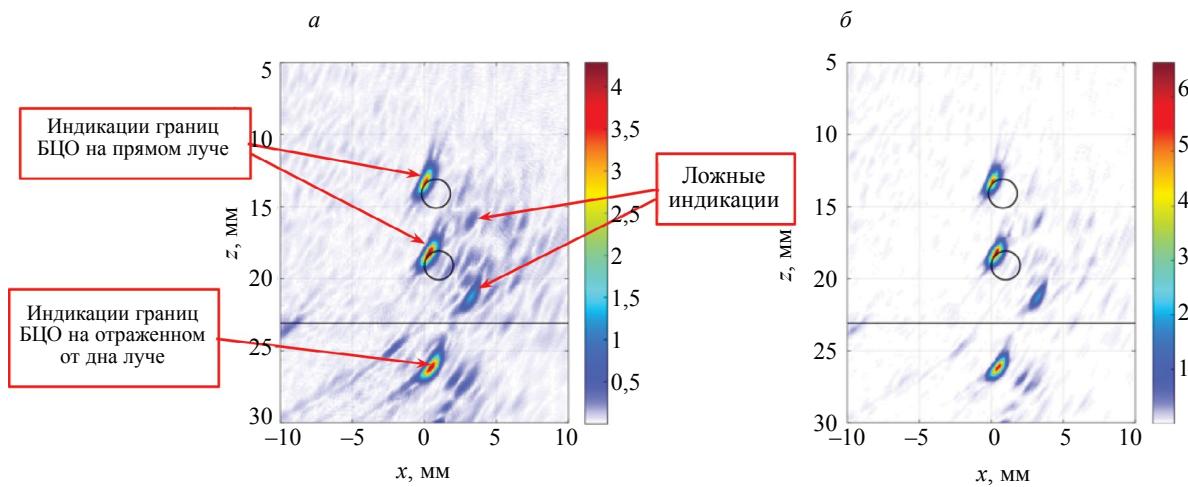


Рис. 7. Изображения двух БЦО, восстановленные по акустической схеме ТdТ: $I_{S,S}$ (a); $I_{S,DMAS}$ (b).

На рис. 8 a показано $I_{DMAS,S}$ -изображение трещины, а на рис. 8 b показано $I_{DMAS,DMAS}$ -изображение, на котором уровень шума по сравнению с ЦФА-изображением на рис. 7 a уменьшился примерно на 20 дБ, а фронтальная разрешающая способность возросла примерно в два раза. Отметим, что амплитуда ложной индикации уменьшилась более чем на 9 дБ.

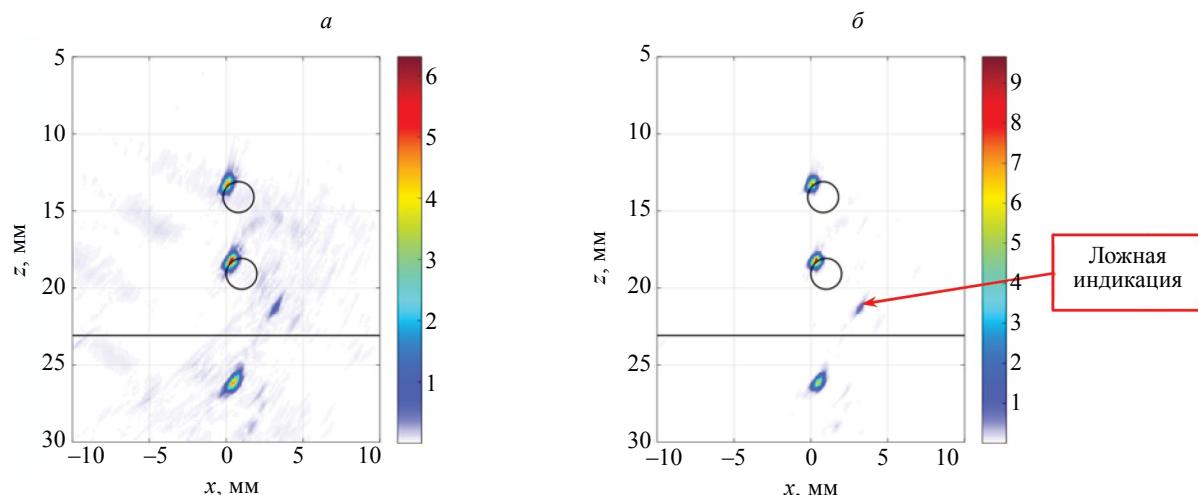


Рис. 8. Изображения двух БЦО, восстановленные по акустической схеме ТdТ: $I_{DMAS,S}$ (a); $I_{DMAS,DMAS}$ (b).

4.3. Образец СО-1

Для проверки эффективности работы алгоритма DMAS и метода CF в условиях повышенного уровня шума в плексигласовом стандартном образце СО-1 восстанавливались изображения границ БЦО диаметром 2 мм на глубинах 50, 55 и 60 мм. Для искусственного увеличения уровня шума амплитуда зондирующего импульса была уменьшена до 10 В. Эхосигналы регистрировались антенной решеткой с частотой 5 МГц из 64 элементов размерами $0,55 \times 10$ мм с зазором 0,05 мм, установленной непосредственно на образец СО-1.

На рис. 9 a показано $I_{S,S}$ -изображение трех БЦО по акустической схеме LdL. Контуры образца показаны на рис. 9 b тонкими линиями черного цвета. Видны индикации границ БЦО и индикация дна образца с тенью от самого глубокого отверстия. На рис. 9 b показано $I_{S,DMAS}$ -изображение, на котором уровень шума уменьшился примерно на 15 дБ. На рис. 9 c показано $I_{S,DMAS} \times I_{CF}$ -изображение, на котором уровень шума в сравнении с изображением на рис. 9 a уменьшился примерно на 25 дБ.

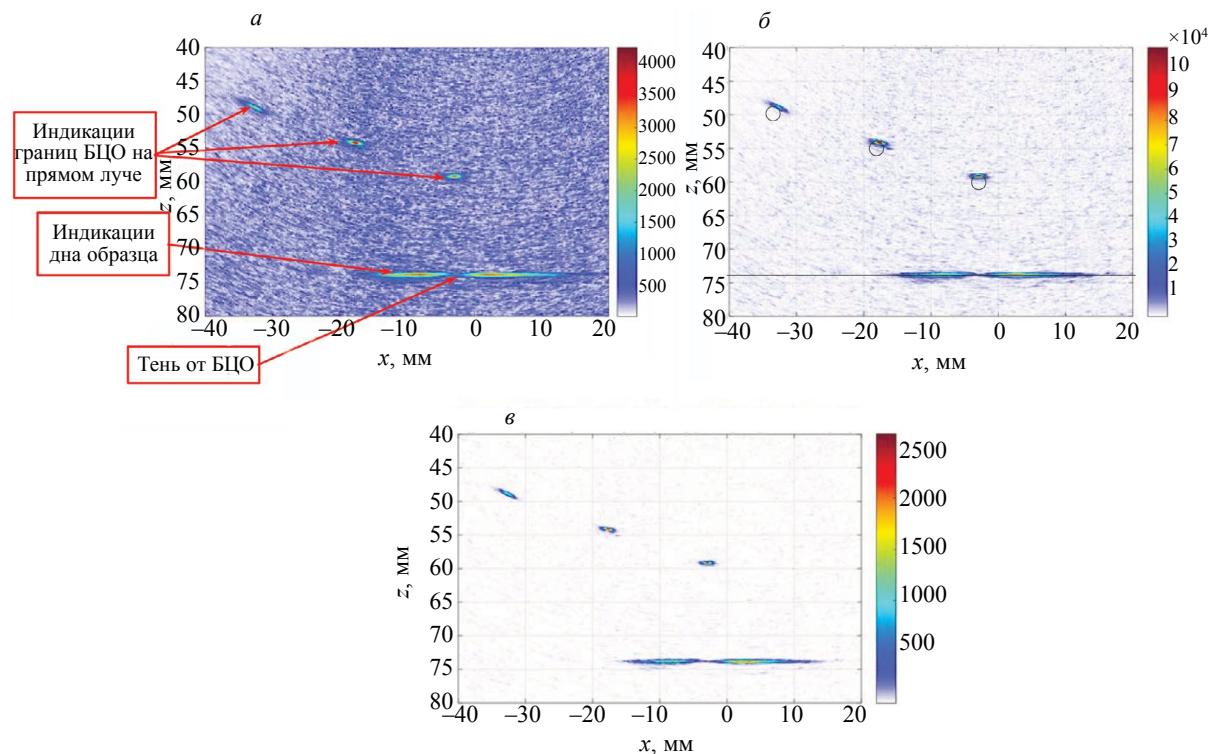


Рис. 9. Изображения трех БЦО, восстановленные по акустической схеме LdL: $I_{S,S}$ (a); $I_{S,DMAS}$ (b); $I_{S,DMAS} \times I_{CF}$ (c).

На рис. 10 a показано $I_{DMAS,S}$ -изображение трех БЦО по акустической схеме LdL. Процедура DMAS применялась на первом этапе при формировании повышательных изображений (см. табл. 1, строка 1). Контуры образца показаны на рис. 10 b тонкими линиями черного цвета. Хорошо видны индикации границ БЦО и индикация дна образца с тенью от самого глубокого отверстия. На рис. 10 b показано $I_{DMAS,DMAS}$ -изображение, на котором уровень шума уменьшился примерно на 15 дБ. На рис. 10 c показано $I_{DMAS,DMAS} \times I_{CF}$ -изображение, на котором уровень шума в сравнении с изображением на рис. 10 a уменьшился примерно на 21 дБ.

Если сравнивать исходное $I_{S,S}$ -изображение трех БЦО на рис. 9 a с $I_{DMAS,DMAS} \times I_{CF}$ -изображением на рис. 10 c , то можно утверждать, что на последнем изображении уровень шума уменьшился более чем на 20 дБ, а фронтальная и лучевая разрешающие способности возросли примерно в два раза.

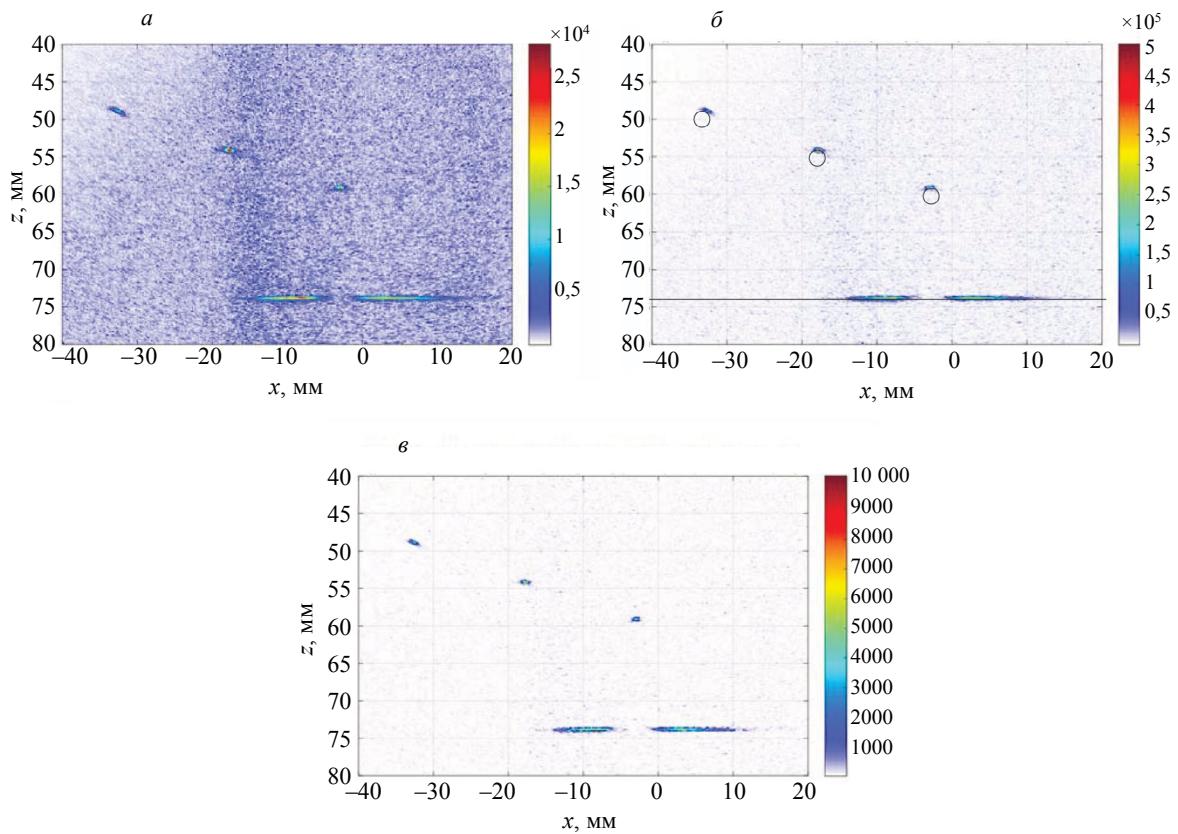


Рис. 10. Изображения трех БЦО, восстановленные по акустической схеме LdL: $I_{\text{DMAS}, s}$ (а); $I_{\text{DMAS, DMAS}} \times I_{\text{CF}}$ (б); $I_{\text{DMAS, DMAS}} \times I_{\text{CF}}^2$ (в).

5. ВЫВОДЫ

Таким образом, по результатам исследований, изложенных в данной статье, можно сделать следующие выводы:

1. Применение CF- или DMAS-технологий в различных сочетаниях перспективно, так как эти технологии достаточно простые и практически не требуют дополнительных ресурсов, но при этом повышают разрешающую способность более чем в два раза и могут уменьшить уровень шума более чем на 20 дБ.

2. Как было показано в численном эксперименте (см. раздел 3.1), что даже при точно известных параметрах опыта фазовые искажения из-за комплексных коэффициентов преломления и отражения приводят к тому, что при работе по акустической схеме TdT индикация вершины трещины может сместиться от своего истинного положения вверх примерно на длину волны (см. рис. 2). Для решения задач дефектометрии это очень большая ошибка. Но если при восстановлении изображения отражателей проводить коррекцию фазы, то индикация вершины трещины совпадает со реальным положением вершины модели трещины (см. рис. 4).

CF- или DMAS-технологии показали свою работоспособность и при работе с зашумленными эхосигналами (раздел 4.3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов В.Н., Воронкова Л.Д. Просто о преобразователях с фазированными решётками в ультразвуковом контроле / Монография. М.: Спектр, 2019. 135 с. : ил. Библиогр. в конце ст. ISBN 978-5-4442-0144-2.
2. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решёток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1. С. 64—70.
3. Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решётки или фазированные антенные решётки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51—75.

4. ISO 23865:2021. Non-destructive testing — Ultrasonic testing — General use of full matrix capture/total focusing technique (FMC/TFM) and related technologies. URL: <https://www.iso.org/standard/78034.html> (дата обращения: 28.07.2024).
5. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхометод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.
6. Неронский Л.Б., Михайлов В.Ф., Брагин И.В. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны / Учеб. пособие. Ч. 2. СПб.: СПбГУАП, 1999. 220 с.: ил.
7. Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation // NDT&E International. 2005. V. 38. P. 701—711.
8. Базулин Е.Г. О терминологии в области применения ЦФА/TFM с учётом вышедших стандартов ISO 23865:2021 и ISO 23864:2021. URL: <https://echoplus.ru/publication/prochee/o-terminologi-v-oblasti-primeneniya-tsfa-tfm-s-uchyotom-vyshedshikh-standartov-iso-23865-2021-i-is/> (дата обращения: 05.09.2024).
9. Wells P.N.T. Ultrasonics in medicine and biology // Phys. Med. Biol. Jul. 1977. V. 22. No. 4. P. 629—669. DOI: 10.1088/0031-9155/22/4/001
10. Matrone G., Savoia A.S., Caliano G., Magenes G. The delay multiply and sum beamforming algorithm in ultrasound B-mode medical imaging // IEEE Trans. Med. Imag. Apr. 2015. V. 34. No. 4. P. 940—949. DOI: 10.1109/TMI.2014.2371235
11. Hollman K.W., Rigby K.W., O'Donnell M. Coherence factor of speckle from a multi-row probe // Proc. IEEE Ultrason. 440 Symp. 1999. P. 1257—1260. DOI: 10.1109/ULTSYM.1999.849225
12. Nilsen C.-I., Holm S. Wiener beamforming and the coherence factor in ultrasound imaging // IEEE Trans. Ultrason. Ferro-442 electr. Freq. Control. 2010. V. 57. No. 6. P. 1329—1346. DOI: 10.1109/TUFFC.2010.1553
13. Kang S., Lee J., Chang J.H. Effectiveness of synthetic aperture focusing and coherence factor weighting for intravascular ultrasound imaging // Ultrasonics. 2021. V. 113. P. 106364. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106364
14. Gauthier Baptiste, Painchaud Guillaume, Le Duff Alain, Belanger Pierre. Lightweight and Amplitude-Free Ultrasonic Imaging Using Single-Bit Digitization and Instantaneous Phase Coherence // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2022. P. 1—1. ISSN 1525-8955. DOI: 10.1109/TUFFC.2022.3163621
15. Базулин Е.Г. Использование коэффициента когерентности для повышения качества изображения отражателей при проведении ультразвукового контроля // Дефектоскопия. 2017. № 6. С. 5—17.
16. Camacho Jorge, Fritsch Carlos, Fernandez-Cruza Jorge, Parrilla Montserrat. Phase Coherence Imaging: Principles, applications and current developments // Proceedings of Meetings on Acoustics. September 2019. V. 38 (1). P. 055012. DOI: 10.1121/2.0001201. URL: <https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/2.0001201> (accessed: 07/28/2024).
17. Okumura S., Taki H., Sato T. Stabilization techniques for high resolution ultrasound imaging using beamspace Capon method / 2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). South Brisbane, QLD. 2015. P. 892—896.
18. Bazulin E. The maximum entropy method in ultrasonic non-destructive testing – increasing the resolution, image noise reduction and echo acquisition rate // Entropy. 2018. V. 20 (8). P. 621. DOI: <https://doi.org/10.3390/e20080621>
19. Guarneri G.A., Pipa D.R., Junior F.N., Ramos de Arruda L.V., Zibetti M.V.W. A Sparse Reconstruction Algorithm for Ultrasonic Images in Nondestructive Testing // Sensors. 2015. V. 15. P. 9324—9343. DOI: 10.3390/s150409324
20. Базулин Е.Г., Соколов Д.А. Восстановление ультразвуковых изображений отражателей по неполным данным методом распознавания со сжатием // Акуст. журн. 2019. № 4. С. 520—532.
21. Song H., Yang Y. Super-resolution visualization of subwavelength defects via deep learning-enhanced ultrasonic beamforming: A proof-of-principle study // NDT & E International. 2020. P. 102344. DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102344
22. Zhang F., Luo L., Li J., Peng J., Zhang Y., Gao X. Ultrasonic adaptive plane wave high-resolution imaging based on convolutional neural network // NDT & E International. June 2023. V. 138. P. 102891. DOI: 10.1016/j.ndteint.2023.102891
23. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Ультразвуковой контроль / В кн.: Неразрушающий контроль. Справочник. Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
24. Hollman K.W., Rigby K.W., O'Donnell M. Coherence factor of speckle from a multi-row probe // IEEE Ultrasonics Symp. Proc. Int. Symp. 1999. V. 2. P. 1257—1260.
25. Camacho J., Parrilla M., Fritsch C. Phase coherent image // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. 2009. V. 56. No. 5. P. 958—974.
26. Cruza J.F., Camacho J., Fritsch C. Plane-wave phase-coherence imaging for NDE // NDT & E International. 2017. V. 87. P. 31—37. DOI: 10.1016/j.ndteint.2017.01.005. URL: <https://sci-hub.ru/https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.01.005> (date of application: 09/15/2024).
27. <https://sci-hub.ru/10.1109/TUFFC.2011.1901> (date of application: 09/15/2024).

28. *Ke Song, Duo Chen.* Comparison of coherence factor and sign coherence factor applied to a nonlinear beamformer / Special Issue: A Special Selection on Recent Advances in Biomechanical Engineering — Part II. Guest Editors: Esteban Peña Pitarch and Eddie Y. K. Ng. DOI: 10.1142/S0219519423401012. URL: <https://worldscientific.com/doi/epdf/10.1142/S0219519423401012> (date addresses: 09/15/2024).
29. *Le Duff Alain, Painchaud-April Guillaume.* Phase Coherence Imaging for Flaw Detection: URL: https://www.ndt.net/article/ndtnet/papers/Phase_Coherence_Imaging_for_Flaw_Detection.pdf (date of application: 09/15/2024).
30. Фирма EXTENDE: офиц. сайт URL: <https://www.extende.com/ndt> (дата обращения: 11.05.2024).
31. *Базулин Е.Г.* Когерентное восстановление изображений дефектов с учётом эффекта незеркального отражения ультразвуковых импульсов от границ объекта контроля // Дефектоскопия. 2010. № 7(46). С. 18—29.
32. *Базулин Е.Г.* Использование метода инверсного C-SAFT для выравнивания пространственной чувствительности изображения отражателей // Дефектоскопия. 2015. № 1. С. 58—71.
33. Научно-производственный центр «ЭХО+». Офиц. сайт URL: <https://echoplus.ru/> (дата обращения: 11.09.2024).

REFERENCES

1. *Danilov V.N., Voronkova L.D.* Just about converters with phased arrays in ultrasonic control. Monograph. M : Spectrum, 2019. 135 p. : ill. Bibliogr. at the end of the article. ISBN 978-5-4442-0144-2.
2. *Voronkov V.A., Voronkov I.V., Kozlov V.N., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G.* On the applicability of antenna array technology in solving problems of ultrasonic control of hazardous production facilities // In the world of non-destructive testing. 2011. No. 1. P. 64—70.
3. *Bazulin E.G.* Comparison of systems for ultrasonic non-destructive testing using antenna arrays or phased array antennas // Flaw detection. 2013. No. 7. P. 51—75.
4. ISO 23865:2021. Non-destructive testing — Ultrasonic testing — General use of full matrix capture/total focusing technique (FMC/TFM) and related technologies. URL: <https://www.iso.org/standard/78034.html> (date of application: 07/28/2024).
5. *Kovalev A.V., Kozlov V.N., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G., Yakovlev N.N.* Pulse echo method for concrete control. Interference and spatial selection // Flaw detection. 1990. No. 2. P. 29—41.
6. *Neronsky L.B., Mikhailov V.F., Bragin I.V.* Microwave equipment for remote sensing of the Earth's surface and atmosphere. Radars with synthesized antenna aperture / Textbook. Part 2. SPb.: SPbSUAP, 1999. 220 p.: ill.
7. *Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D.* Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation // NDT&E International. 2005. V. 38. P. 701—711.
8. *Bazulin E.G.* About terminology in the field of CFA/TFM application, taking into account the published ISO 23865:2021 and ISO 23864:2021 standards. URL: <https://echoplus.ru/publication/prochee/o-terminologii-v-oblasti-primeneniya-tsfa-tfm-s-uchyotom-vyshedsikh-standartov-iso-23865-2021-i-is/> (accessed 05.09.2024).
9. *Wells P.N.T.* Ultrasonics in medicine and biology // Phys. Med. Biol. Jul. 1977. V. 22. No. 4. P. 629—669. DOI: 10.1088/0031-9155/22/4/001
10. *Matrone G., Savoia A.S., Caliano G., Magenes G.* The delay multiply and sum beamforming algorithm in ultrasound B-mode medical imaging // IEEE Trans. Med. Imag. Apr. 2015. V. 34. No. 4. P. 940—949. DOI: 10.1109/TMI.2014.2371235
11. *Hollman K.W., Rigby K.W., O'Donnell M.* Coherence factor of speckle from a multi-row probe // Proc. IEEE Ultrason. 440 Symp. 1999. P. 1257—1260. DOI: 10.1109/ULTSYM.1999.849225
12. *Nilsen C.-I., Holm S.* Wiener beamforming and the coherence factor in ultrasound imaging // IEEE Trans. Ultrason. Ferro-442 electr. Freq. Control. 2010. V. 57. No. 6. P. 1329—1346. DOI: 10.1109/TUFFC.2010.1553
13. *Kang S., Lee J., Chang J.H.* Effectiveness of synthetic aperture focusing and coherence factor weighting for intravascular ultrasound imaging // Ultrasonics. 2021. V. 113. P. 106364. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106364
14. *Gauthier Baptiste, Painchaud Guillaume, Le Duff Alain, Belanger Pierre.* Lightweight and Amplitude-Free Ultrasonic Imaging Using Single-Bit Digitization and Instantaneous Phase Coherence // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2022. P. 1—1. ISSN 1525-8955. DOI: 10.1109/TUFFC.2022.3163621
15. *Bazulin E.G.* Using the coherence coefficient to improve the image quality of reflectors during ultrasonic testing // Flaw detection. 2017. No. 6. P. 5—17.
16. *Camacho Jorge, Fritsch Carlos, Fernandez-Cruza Jorge, Parrilla Montserrat.* Phase Coherence Imaging: Principles, applications and current developments // Proceedings of Meetings on Acoustics. September 2019. V. 38 (1). P. 055012. DOI: 10.1121/2.0001201. URL: <https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/2.0001201> (accessed: 07/28/2024).
17. *Okumura S., Taki H., Sato T.* Stabilization techniques for high resolution ultrasound imaging using beamspace Capon method / 2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). South Brisbane, QLD. 2015. P. 892—896.

18. *Bazulin E.* The maximum entropy method in ultrasonic non-destructive testing – increasing the resolution, image noise reduction and echo acquisition rate // Entropy. 2018. V. 20 (8). P. 621. DOI: <https://doi.org/10.3390/e20080621>
19. *Guarneri G.A., Pipa D.R., Junior F.N., Ramos de Arruda L.V., Zibetti M.V.W.* A Sparse Reconstruction Algorithm for Ultrasonic Images in Nondestructive Testing // Sensors. 2015. V. 15. P. 9324—9343. DOI: 10.3390/s150409324
20. *Bazulin E.G., Sokolov D.A.* Restoration of ultrasonic images of reflectors based on incomplete data by the recognition method with compression // Acoustic. Journal. 2019. No. 4. P. 520—532.
21. *Song H., Yang Y.* Super-resolution visualization of subwavelength defects via deep learning-enhanced ultrasonic beamforming: A proof-of-principle study // NDT & E International. 2020. P. 102344. DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102344
22. *Zhang F., Luo L., Li J., Peng J., Zhang Y., Gao X.* Ultrasonic adaptive plane wave high-resolution imaging based on convolutional neural network // NDT & E International. June 2023. V. 138. P. 102891. DOI: 10.1016/j.ndteint.2023.102891
23. *Ermolov I.N., Lange Yu.V.* Ultrasonic control. In the book: Non-destructive testing. Guide. Under the general editorship of V. V. Klyuev. V. 3. M.: Mechanical engineering, 2004. 864 p.
24. *Hollman K.W., Rigby K.W., O'Donnell M.* Coherence factor of speckle from a multi-row probe // IEEE Ultrasonics Symp Proc Int Symp. 1999. V. 2. P. 1257—1260.
25. *Camacho J., Parrilla M., Fritsch C.* Phase coherent image // EEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. 2009. V. 56. No. 5. P. 958—974.
26. *Cruza J.F., Camacho J., Fritsch C.* Plane-wave phase-coherence imaging for NDE // NDT & E International. 2017. V. 87. P. 31—37. DOI: 10.1016/j.ndteint.2017.01.005 URL: <https://sci-hub.ru/https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.01.005> (date of application: 09/15/2024).
27. <https://sci-hub.ru/10.1109/TUFFC.2011.1901> (date of application: 09/15/2024).
28. *Ke Song, Duo Chen.* Comparison of coherence factor and sign coherence factor applied to a nonlinear beamforme / Special Issue: A Special Selection on Recent Advances in Biomechanical Engineering — Part II. Guest Editors: Esteban Peña Pitarch and Eddie Y. K. Ng. DOI: 10.1142/S0219519423401012. URL: <https://worldscientific.com/doi/epdf/10.1142/S0219519423401012> (date addresses: 09/15/2024).
29. *Le Duff Alain, Painchaud-April Guillaume.* Phase Coherence Imaging for Flaw Detection: URL: https://www.ndt.net/article/ndtnet/papers/Phase_Coherence_Imaging_for_Flaw_Detection.pdf (date of application: 09/15/2024).
30. EXTENDE company: ofic. website URL: <https://www.extende.com/ndt> (date of reference: 05/11/2024).
31. *Bazulin E.G.* Coherent reconstruction of defect images taking into account the effect of specular reflection of ultrasonic pulses from the boundaries of the control object // Flaw detection. 2010. No. 7 (46). P. 18—29.
32. *Bazulin E.G.* Using the inverse C-SAFT method to equalize the spatial sensitivity of the image of reflectors // Flaw detection. 2015. No. 1. P. 58—71.
33. Scientific and production center “ECHO+”. Ofic. website URL: <https://echoplus.ru/> / (date of access: 09/11/2024).

ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ГАЗОРАЗРЯДНОГО ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ДЕФЕКТОСКОПИИ

© 2024 г. Д.А. Дерусова^{1,*}, В.О. Некорошев^{1,2,**}, В.Ю. Шпильной^{1,***}, А.В. Раут^{3,****}

¹Томский политехнический университет, Россия 634028 Томск, ул. Савиных, 7

²Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия 634055 Томск, пр. Академический, 2/3

³Российский университет дружбы народов, Россия 117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

E-mail: *red@tpu.ru; **nvo@lnp.hcei.tsc.ru; ***vshpilnoy@list.ru; ****amolvr23@gmail.com

Поступила в редакцию 17.10.2024; после доработки 28.10.2024

Принята к публикации 29.10.2024

Представлены результаты исследования газоразрядного электроакустического преобразователя, функционирующего на основе импульсного разряда в воздухе при атмосферном давлении. Рассмотрено влияние конфигурации электродной системы на акустические характеристики преобразователя. Показано, что изменение объема разрядной камеры и межэлектродного зазора преобразователя оказывают значительное влияние на интенсивность излучения. Выявлены особенности, возникающие при использовании электроакустических преобразователей открытого и закрытого типов в задачах дефектоскопии. Показано, что газоразрядный электроакустический преобразователь открытого типа является достаточно мощным широкополосным источником сигнала возбуждения и имеет перспективы применения в неразрушающем контроле. Газоразрядный электроакустический преобразователь закрытого типа имеет преимущества при исследовании изделий с особыми требованиями к чистоте поверхности или величине прикладываемого внешнего электрического поля.

Ключевые слова: акустика, ультразвук, лазерная допплеровская виброметрия, дефектоскопия, композиционные материалы, полимерные материалы, искровой разряд, электроакустика, термоакустика, неразрушающий контроль.

APPLICATION OF PULSE GAS-DISCHARGE ELECTROACOUSTIC TRANSDUCER FOR NONDESTRUCTIVE TESTING

© 2024 D.A. Derusova^{1,*}, V.O. Nekhoroshev^{1,2,**}, V.Yu. Shpil'noy^{1,***}, A.V. Raut^{3,****}

¹Tomsk Polytechnic University, Russia 634028 Tomsk, st. Savinykh, 7

²Institute of High Current Electronics SB RAS, Russia 634055 Tomsk, Akademichesky Ave., 2/3

³Peoples' Friendship University of Russia, Russia 117198 Moscow, st. Miklukho-Maklaya, 6

E-mail: *red@tpu.ru; **nvo@lnp.hcei.tsc.ru; ***vshpilnoy@list.ru; ****amolvr23@gmail.com

This paper presents the results of a gas-discharge electro acoustic transducer of two configurations, operating on the basis of a pulsed discharge in air at atmospheric pressure. The influence of the electrode configuration on the acoustic characteristics of the transducer is considered. It is shown that a change in the volume of the discharge chamber and the inter-electrode gap have a significant effect on the radiation intensity of the transducer. The features that arise when using open and closed type electro acoustic transducers in flaw detection problems are revealed. It is shown that an open type gas-discharge electroacoustic transducer is a sufficiently powerful broadband source of the excitation signal and has prospects for use in non-destructive testing. A closed type gas-discharge electroacoustic transducer has advantages when testing materials with special requirements for surface cleanliness or the magnitude of the applied external electric field.

Keywords: acoustics, ultrasound, laser Doppler vibrometry, flaw detection, spark discharge, electroacoustics, thermoacoustics, non-destructive testing.

DOI: 10.31857/S0130308224120034

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время технологический прогресс и развитие промышленного производства изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) имеют тенденцию к усложнению состава современных конструкционных материалов. С одной стороны, сочетание различных конструкционных компонентов позволяет оптимизировать физические свойства изделия под требуемые практические задачи, а с другой стороны, обуславливает возникновение специфических производственных и эксплуатационных дефектов. Например, в авиакосмических применениях [1—3] особое внимание уделяется использованию ПКМ для изготовления легковесных сэндвич-панелей с обшивкой из многослойного пластика. Такие конструкции способны выдержать сравнительно большие нагрузки на изгиб, а также поглощать внешние механические воздействия [4]. Однако при ударном воздействии в этих материалах

могут возникать дефекты в виде трещин, множественных расслоений, а также отслоений обшивки ПКМ от наполнителя [5—7].

При сложной форме поверхности изделия, наличии покрытий или особых требований к чистоте поверхности традиционные методы неразрушающего контроля (НК), подразумевающие непосредственное воздействие на объект исследования или размещение на нем датчиков, оказываются неприемлемы. В ряде случаев применение традиционных методов НК затруднено ввиду специфических условий проведения процедуры дефектоскопии. Сложности возникают при дефектоскопии объектов, нагретых до высоких температур, находящихся под электрическим потенциалом, механическим напряжением или давлением, врачающихся и движущихся частей механизмов. В связи с этим разработка методик контроля качества новых конструкционных материалов и изделий из них является актуальной задачей научных исследований и вос требована на практике.

В последнее время особое внимание уделяется разработке бесконтактных методов НК для дефектоскопии и контроля качества изделий из ПКМ. Перспективным методом является неразрушающий контроль изделий с использованием сканирующей лазерной доплеровской виброметрии (СЛДВ) при бесконтактной акустической стимуляции материалов [8—10]. Данный подход подразумевает бесконтактное акустическое воздействие на контролируемые изделия и регистрацию свободных колебаний исследуемых образцов. Известно, что наличие дефектов в структуре материалов приводит к локальному уменьшению жесткости изделий и изменению их физических свойств [11]. При этом происходит изменение акустической характеристики всей исследуемой системы и возникают дополнительные спектральные линии, характерные для резонансных частот колебаний дефектов.

Несмотря на перечисленные преимущества, проведение неразрушающих испытаний в рамках описанного подхода имеет некоторые сложности. Во-первых, в воздушной среде происходит затухание акустических волн ультразвукового диапазона даже на небольших расстояниях от объекта (порядка нескольких сантиметров). Во-вторых, следует отметить частичное отражение вводимых акустических волн от поверхности контролируемых материалов из-за различия акустического импеданса сред. Отдельно стоит отметить, что частоты локальных резонансов подповерхностных дефектов характерных размеров порядка единиц и десятков миллиметров лежат в диапазоне частот от единиц до сотен килогерц [11—14]. Ввиду сложной структуры дефектов в ПКМ для регистрации резонансных откликов в зоне дефектов требуется применение широкополосного сигнала возбуждения. В результате формируются специфические требования к источнику возбуждения акустических волн в воздушной среде: бесконтактный излучатель должен иметь широкую полосу рабочих частот и достаточную акустическую мощность для активации локальных резонансных откликов в области дефектов.

В литературе описаны бесконтактные акустические системы на основе пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), имеющих узкий диапазон рабочих частот [15]. На практике, для получения широкополосного сигнала используют ПЭП набор с различными частотными характеристиками [16]. При этом значительные трудности возникают с получением фазированного сигнала. Кроме того, мощность ПЭП ограничена его рабочим напряжением, следовательно, для повышения мощности приходится использовать ПЭП с большими массогабаритными показателями. Это приводит к сложностям при работе с объектами относительно небольших размеров или изделиями сложной формы.

В то же время в ряде работ показана возможность применения электрического разряда для колебаний молекул в различных средах [17], в частности генерации акустических волн в воздушной среде [18—20]. В некоторых случаях формирование акустических волн при протекании тока разряда связывают с так называемым электротермоакустическим эффектом [18]. Ранее авторами настоящей работы был предложен импульсный газоразрядный электроакустический преобразователь (ГЭАП), функционирующий на основе искрового разряда в воздухе при атмосферном давлении [21]. Было показано, что протекание тока искрового разряда в электродной системе ГЭАП сопровождается скачком давления в воздушной среде, в результате чего формируется мощный импульс (до 85 дБ) в относительно широком диапазоне частот от сотен герц до 4 МГц [21]. Однако в настоящее время недостаточно изучены как электрофизические процессы, приводящие к формированию акустических колебаний в воздушном пространстве, так и газоразрядные явления в ГЭАП такого типа. Особенности, возникающие на практике при использования таких систем в задачах неразрушающего контроля, также практически не изучены.

В настоящей работе приведены результаты исследования газоразрядных и акустических процессов в ГЭАП при различных конфигурациях его электродной системы. В результате анализа экспериментально полученных данных дана характеристика ГЭАП как газоразрядной нагрузки. Выявлено влияние конструкционных особенностей электродной системы ГЭАП на его акустические характеристики. Определены режимы, пригодные для акустического возбуж-

дения объектов исследования в задачах неразрушающего контроля и дефектоскопии. На основе СЛДВ с применением ГЭАП выполнен модельный эксперимент по обнаружению дефекта в виде несквозного отверстия прямоугольной формы в полиметилметакрилате (ПММА).

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе эксперимента для генерации сигнала возбуждения использовались импульсные ГЭАП на основе искрового разряда в воздухе при атмосферном давлении. Упрощенные схемы акустических систем на основе ГЭАП с различной конструкцией электродной системы представлены на рис. 1.

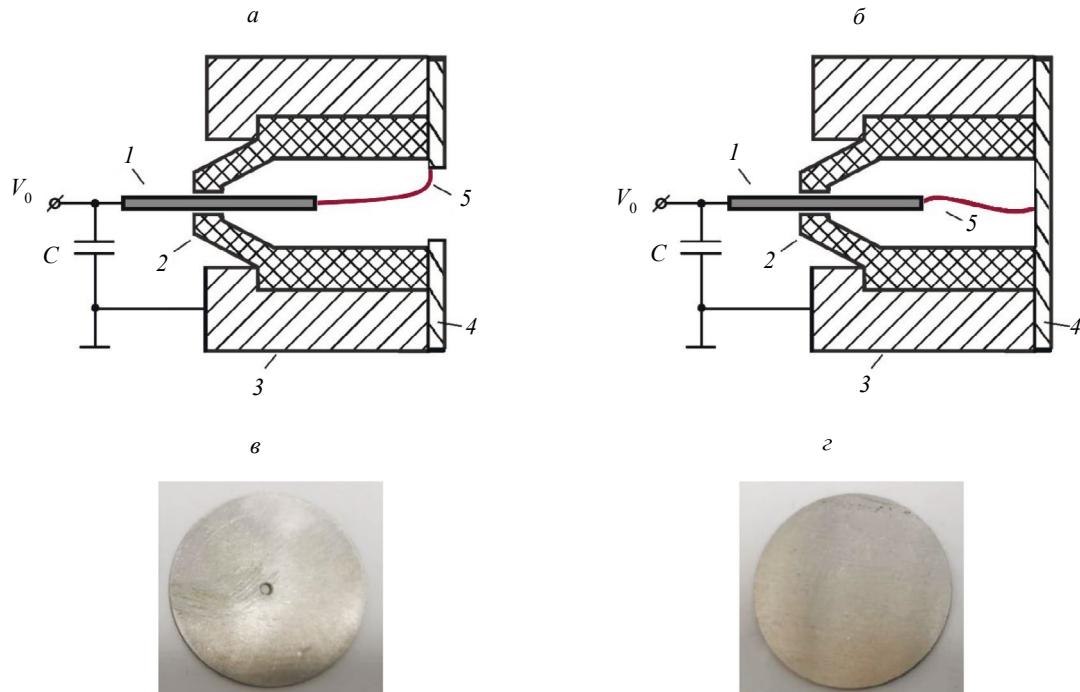


Рис. 1. Упрощенная схема ГЭАП открытого (*а*) и закрытого (*б*) типов, а также фотографии соответствующих обратных электродов открытого типа с отверстием (*в*) и закрытого типа (*г*): 1 — острыйный электрод; 2 — изолятор; 3 — обратный токопровод; 4 — дисковый электрод (мембрана); 5 — схематичное положение канала разряда.

Общей особенностью в работе систем для генерации акустических колебаний на основе импульсного ГЭАП является использование скачка давления, сопутствующего протеканию импульса тока разряда. Более подробно принцип действия ГЭАП описан в [19—21]. Основное отличие исследуемых ГЭАП заключается в конструкционном исполнении дискового электрода *4*, выполняющего одновременно роль обратного токопровода в газоразрядном контуре и мембранны, которая является излучающей поверхностью электроакустического преобразователя. В случае, когда мембрана *4* выполнена с отверстием в центре (рис. 1*а*), объем электродной системы сообщается с атмосферой. Это позволяет беспрепятственно осуществлять вывод акустических колебаний в окружающее пространство. Излучающими поверхностями ГЭАП являются периферийная область плазмы газового разряда, поверхности электродов и изолятора. Такая конфигурация электродной системы ГЭАП условно называется открытой. В случае, когда мембрана *4* не имеет отверстия, она является одновременно основной излучающей поверхностью ГЭАП и диафрагмой, отделяющей объем разрядной камеры от внешней среды. Такая газоразрядная система условно называется закрытой (рис. 1*б*).

В настоящей работе приведены результаты исследования акустических характеристик ГЭАП закрытого и открытого типов при исполнении мембранны *4* в виде диска диаметром 30 мм с отверстиями диаметром от 1 до 3 мм в последнем случае. Все исследуемые мембранны изготовлены из дюралюминия толщиной 1 мм.

Колебания мембранны ГЭАП были зарегистрированы с использованием лабораторной установки на основе сканирующего лазерного доплеровского виброметра (рис. 2).

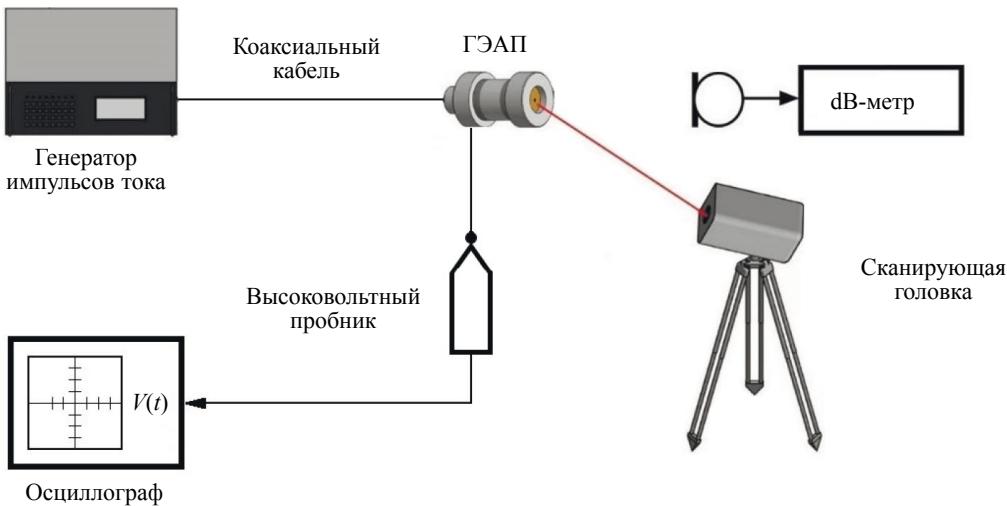


Рис. 2. Функциональная схема лабораторной установки для исследования ГЭАП.

Лабораторная установка включает сканирующую лазерную головку и систему управления доплеровского виброметра PSV-500-3D-HV (Polytec), ГЭАП с коаксиальной линией связи и специализированный генератор импульсов тока с выходным напряжением до 20 кВ и частотой следования импульсов до 3 Гц. Осциллограф DS5032E (Owon) и высоковольтный щуп HVP-28HF (Pintek) использовались для регистрации напряжения на газоразрядном промежутке. Измеритель уровня шума ATE-9015 (Актаком) использовался для определения перепада акустического давления в диапазоне частот до 8 кГц.

Колебания мембранны ГЭАП регистрировали с использованием лазерного виброметра во временном режиме при длительности записи одного импульса 6 мс. При исследовании ГЭАП закрытого типа измерения проводили в центре мембранны, а для открытого ГЭАП — на расстоянии 1 мм от края центрального отверстия. Полученные амплитудно-временные зависимости были использованы для оценки амплитуды виброперемещения на излучающей мемbrane и сравнительного анализа амплитудно-частотного спектра ГЭАП двух типов.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Характеристика ГЭАП как газоразрядной нагрузки

По сути, рассматриваемые ГЭАП схожи с газовым разрядником, работающим в режиме самопробоя. Поскольку система электродов ГЭАП близка к типу «острие—плоскость», потенциал распределен в межэлектродном промежутке неоднородно. Таким образом, электрическое поле вблизи потенциального электрода ГЭАП будет выше среднего поля в газоразрядном промежутке. Кроме того, электрод 1 контактирует с изолятором 2, что приводит к развитию пробоя по поверхности диэлектрика. Эти факторы вызывают уменьшение уровня напряжения, которое необходимо приложить для пробоя газоразрядного промежутка. Межэлектродная емкость ГЭАП не превышает 70 пФ.

Общей особенностью исследуемых ГЭАП является взаимосвязь между величиной межэлектродного зазора в газоразрядном промежутке и энергией, выделяющейся при протекании тока разряда. При увеличении зазора возрастает пробивное напряжение и увеличивается запас энергии в емкостном накопителе. Для межэлектродного зазора на уровне 10 мм пробивное напряжение достигает 15 кВ. В этом случае запас энергии в емкостном накопителе номиналом 2,3 нФ достигает около 0,25 Дж.

Индуктивность отрезка коаксиального кабеля составляет 2 мкГн, индуктивность электродной системы ГЭАП — приблизительно 200 нГн. Следовательно, суммарная индуктивность газоразрядного контура — 2,2 мкГн. При этом волновое сопротивление газоразрядного контура составит приблизительно 30 Ом. Таким образом, при максимальном выходном напряжении генератора около 15 кВ амплитуда импульса тока генератора будет ограничена на уровне 500 А. В действительности, амплитуда тока будет ниже из-за влияния сопротивления искрового разряда и потерь в емкостном накопителе, кабеле и электродах. Таким образом, условия протека-

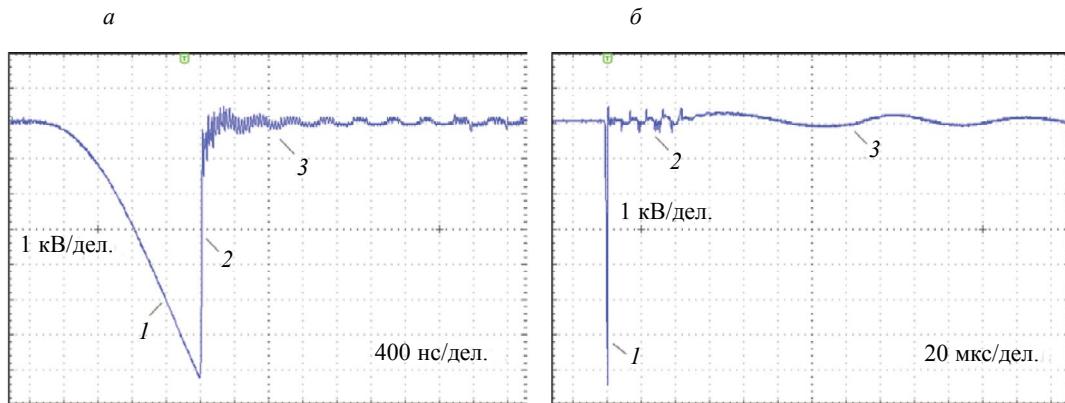


Рис. 3. Детальный (а) и общий (б) вид осцилограмм напряжения на газоразрядном промежутке.

ния газоразрядных процессов во многом определяются не только параметрами электрической схемы, используемой для возбуждения разряда, но и параметрами электродной системы ГЭАП.

В ходе эксперимента регистрировались осцилограммы напряжения на газоразрядном промежутке. Характерный вид осцилограммы напряжения, зарегистрированной при формировании импульса на газоразрядном промежутке с зазором 3 мм, приведен на рис. 3.

При детальном рассмотрении осцилограммы (рис. 3а) можно выделить три стадии. В первой стадии 1 происходит заряд емкостного накопителя от генератора импульсов тока. Длительность фронта импульса напряжения на газоразрядном промежутке составляет 2 мкс. В стадии 2 при определенной величине напряжения на электродах происходит формирование искрового разряда, что приводит к пробою газоразрядного промежутка. При величине зазора 3 мм пробивное напряжение составляет 7,2 кВ и запас энергии в емкостном накопителе достигает 60 мДж. В стадии 3 наблюдаются затухающие колебания напряжения горения разряда с частотой около 2,5 МГц. Длительность стадии 3 составляет около 4 мкс, что значительно больше длительности периода осцилляции напряжения. Это указывает на то, что сопротивление плазмы в канале искрового разряда значительно меньше волнового сопротивления в сильноточном разрядном контуре $\rho = 30$ Ом. Приблизительная оценка средней величины эквивалентного сопротивления искры оказывается порядка 3 Ом. Видно, что основная доля энергии выделяется в искровом разряде за время около 1 мкс. В этом случае грубая оценка импульсной мощности в искровом разряде дает величину порядка 60 кВт.

На рис. 3б приведен общий вид осцилограммы напряжения с горизонтальной разверткой 20 мкс/дел. Стадия 1 соответствует процессам заряда емкостного накопителя и формированию искры, рассмотренным выше. По мере разряда емкостного накопителя напряжение горения разряда уменьшается, и происходит переход искрового разряда в разряд типа дуги (стадия 2). Ввиду осцилляций реактивной мощности в газоразрядном контуре дуговой разряд поддерживается при переменном токе частотой около 100 кГц. Напряжение горения увеличивается по мере спада тока разряда от 100 В до приблизительно 200 В. Длительность этой стадии составляет около 40 мкс. Вероятно, дуга приводит к эрозии изолятора и электродов, при этом практически не оказывая вклада в формирование акустических колебаний. Соответственно, наличие стадии 2 приводит к сокращению срока службы электродной системы ГЭАП и не является желательной. Далее, при определенном напряжении на емкостном накопителе поле в газоразрядном промежутке становится недостаточно для поддержания плазмы. Ток разряда обрывается и в стадии 3 наблюдаются затухающие колебания напряжения ввиду наличия остаточной энергии в первичном накопителе генератора импульсов тока. Длительность стадии 3 составляет приблизительно 300 мкс.

На основе данных, полученных из осцилограмм, определены пробивные напряжения при различных межэлектродных зазорах (рис. 4).

Для рассматриваемых электродных систем ГЭАП пробивное напряжение практически линейно зависит от величины межэлектродного зазора. Исходя из данных, полученных в ходе эксперимента, определена напряженность электрического поля, необходимая для пробоя по поверхности диэлектрика (фторопласт). Пороговая напряженность электрического поля в случае малых (до 2 мм) зазоров составляет около 20 кВ/см. При этом напряженность электрического поля, необходимая для пробоя промежутка более 3 мм, составляет около 10 кВ/см.

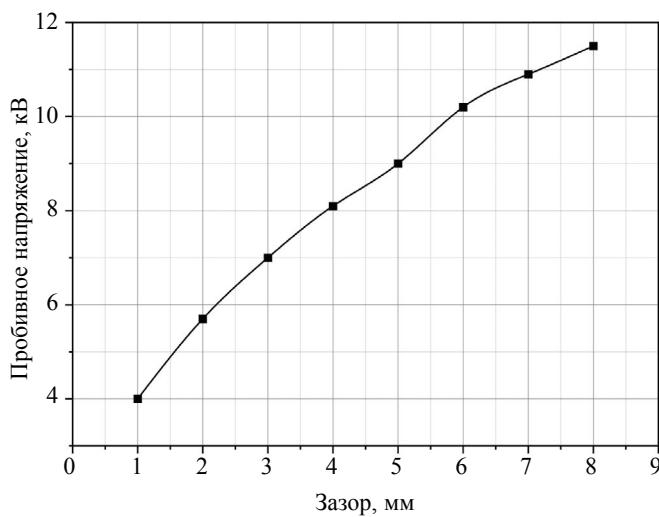


Рис. 4. Амплитуда напряжения, необходимая для развития пробоя по поверхности диэлектрика, при разных величинах межэлектродного зазора.

При минимальной величине зазора около 1 мм пробивное напряжение составляет около 4 кВ. В этом случае запас энергии в емкостном накопителе составляет около 20 мДж. При величине зазора 8 мм пробивное напряжение составляет около 11,5 кВ. В этом случае запас энергии в емкостном накопителе достигает 150 мДж. Таким образом, при изменении величины межэлектродного зазора от 1 до 8 мм запас энергии в емкостном накопителе увеличивается от 20 до 150 мДж. Импульсная мощность, соответственно, изменяется в диапазоне 20—150 кВт, что позволяет регулировать интенсивность излучения ГЭАП в широких пределах за счет изменения величины зазора газоразрядного промежутка.

3.2. Определение акустических характеристик газоразрядного электроакустического преобразователя

С использованием лазерного виброметра во временном режиме было измерено виброперемещение в центре мембран ГЭАП закрытого и открытого типов. Амплитуда первого максимума затухающих колебаний была определена с усреднением по пяти измерениям. Графики, отражающие временной ход виброперемещения на мембранах ГЭАП закрытого и открытого типов, приведены на рис. 5.

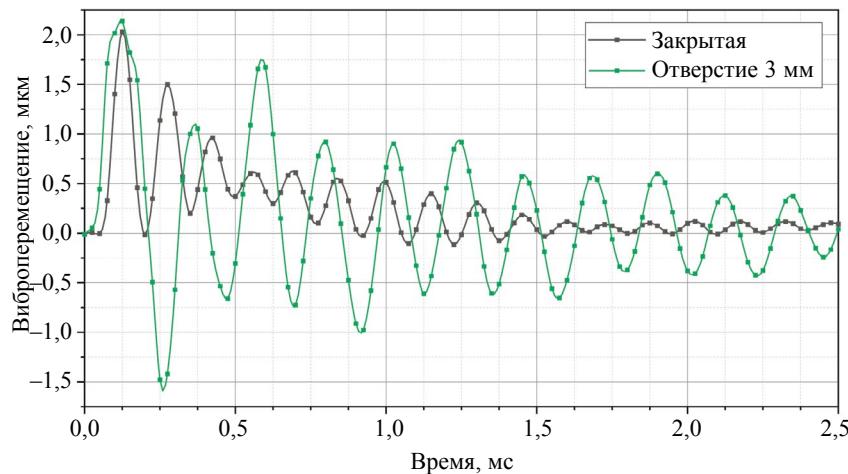


Рис. 5. Сигналы виброперемещения на мембранах ГЭАП закрытого и открытого типов. В ходе эксперимента величина межэлектродного зазора составляла 1 мм при объеме канала разряда 80 mm^3 .

При межэлектродном зазоре 1 мм амплитуда виброперемещения на мембранах ГЭАП закрытого и открытого типов сопоставима и достигает около 2 мкм. Соответствующие значения амплитуды виброскорости мембран открытого и закрытого типа также сопоставимы, и составляют 50 и 45 мм/с соответственно. На графике (см. рис. 5) видно, что среднее значение виброперемещения мембраны ГЭАП закрытого типа в рассматриваемом временном интервале отлично от нуля. Наблюдается смещение равновесного положения мембраны амплитудой около 1 мкм с характерной длительностью процесса порядка 0,5 мс. Это можно объяснить действием избыточного давления в газоразрядной камере, которое возникает ввиду теплового расширения газа при протекании тока разряда. В ГЭАП с открытой системой электродов такой эффект практически не выражен.

При исследовании частотной характеристики ГЭАП зарегистрированные амплитудно-временные зависимости были преобразованы в амплитудно-частотные спектры колебаний мембран ГЭАП с использованием преобразования Фурье, при усреднении данных по пяти измерениям. Полученные амплитудно-частотные спектры ГЭАП в диапазоне частот от 100 Гц до 100 кГц приведены на рис. 6.

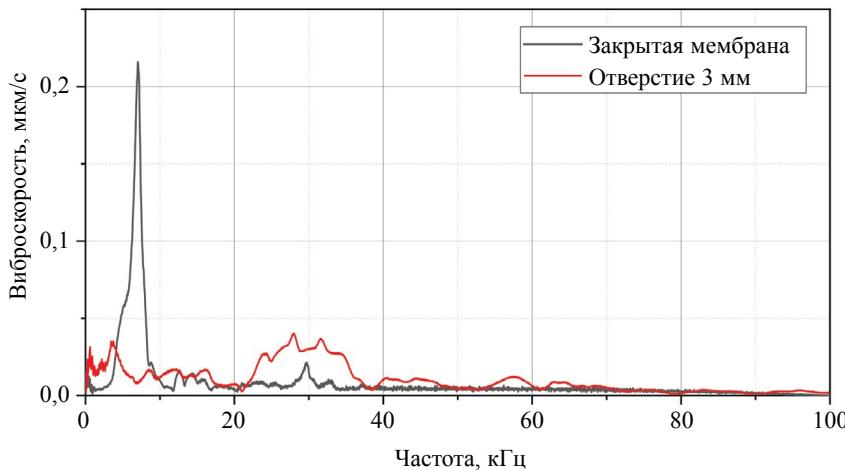


Рис. 6. Амплитудно-частотные спектры ГЭАП закрытого и открытого типов, измеренные в диапазоне частот от 100 Гц до 100 кГц. Диаметр отверстия в мембране ГЭАП открытого типа — 3 мм.

Как видно из рис. 6, амплитудно-частотные спектры электроакустических преобразователей с разной конструкцией электродной системы существенно отличаются. ГЭАП закрытого типа имеет выраженную полосу излучения с центральной частотой 7 кГц, характерной для основной моды колебаний мембранны. Значительная доля энергии колебаний сосредоточена в диапазоне частот от 3 до 10 кГц. Практически отсутствуют спектральные линии с частотами выше 35 кГц. Таким образом, основная доля энергии колебаний мембранны сосредоточена в слышимом звуковом диапазоне (до 10 кГц), максимальная ширина полосы излучения не превышает 33 кГц. Фактически, по своей акустической характеристике он близок к резонансным излучателям. Это объясняется тем, что мембрана ГЭАП является излучающей поверхностью с частотно-избирательными свойствами. В работе [20] было показано, что частотные свойства мембранны определяются, в основном, ее геометрическими размерами и свойствами используемого материала.

ГЭАП открытого типа имеет амплитудно-частотный спектр без ярко выраженных резонансных линий, однако спектральная плотность мощности распределена в диапазоне частот от сотен герц до 40 кГц неравномерно. В низкочастотной области спектра присутствуют спектральные линии с частотами от 300 Гц и пик с центральной частотой 3,7 кГц. В диапазонах частот от 4 до 17 кГц и от 20 до 40 кГц ГЭАП открытого типа имеет широкие полосы частот со значительной плотностью мощности излучения. В низкочастотной области спектра присутствуют линии с частотами 65 кГц и выше. Таким образом, амплитудно-частотный спектр ГЭАП открытого типа практически непрерывен и представляет собой полосу шириной около 70 кГц с неравномерной амплитудой сигнала. Такой ГЭАП является широкополосным источником звуковых и ультразвуковых колебаний, что представляет интерес для акустической стимуляции материалов и изделий при неразрушающем контроле.

3.3. Исследование влияния конструкции ГЭАП на его акустические характеристики

Поскольку условия протекания газоразрядных процессов в значительной степени определяются конструкцией разрядной камеры и электродов ГЭАП, необходимо более подробное исследование влияния конструкционных параметров на его излучающие характеристики. В ходе исследования была определена зависимость амплитуды виброперемещения в центре дюралюминиевой мембраны с отверстием 3 мм от объема разрядной камеры при фиксированном зазоре межэлектродного промежутка ГЭАП на уровне 1 мм. Для изменения объема разрядной камеры при постоянном зазоре использовался комплект изоляторов одинаковой длины и различным внутренним диаметром от 5 до 15 мм. Результаты виброизмерений представлены на рис. 7.

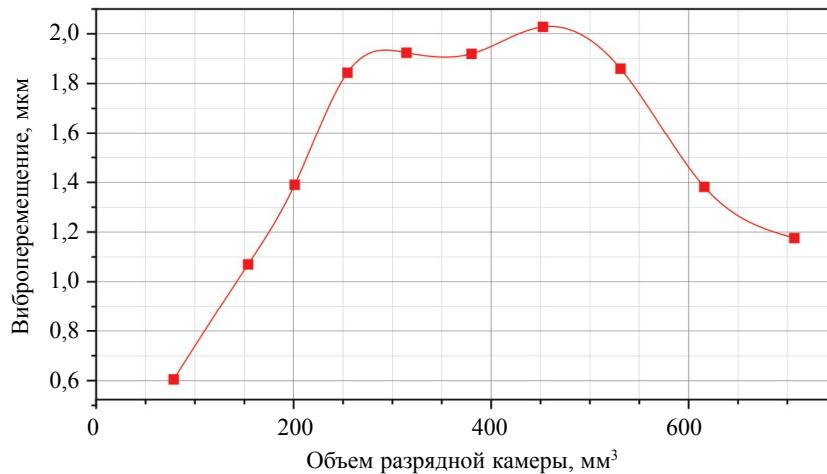


Рис. 7. Амплитуды виброперемещения поверхности мембраны при различных объемах разрядной камеры ГЭАП.

Зависимость амплитуды виброперемещения на мемbrane от объема газоразрядной камеры имеет сложный вид (см. рис. 7). Присутствуют участки с резким увеличением/уменьшением амплитуды виброперемещения при небольшом относительном изменении объема разрядной камеры, а также область, где амплитуда виброперемещения при изменении объема остается практически постоянной. В частности, при увеличении объема разрядной камеры от 80 до 250 мм^3 наблюдается практически линейный рост амплитуды виброперемещения на мемbrane ГЭАП от 0,6 до 2 $\mu\text{м}$. Последующее увеличение объема разрядной камеры до 530 мм^3 практически не влияет на амплитуду виброперемещения мембраны ГЭАП. При дальнейшем увеличении объема разрядной камеры в настоящих условиях наблюдается снижение амплитуды виброперемещения на поверхности мембраны ГЭАП. При увеличении внутреннего диаметра изолятора с 12 до 15 мм, объем разрядной камеры увеличился на 25 %, однако амплитуда уменьшилась почти в 2 раза.

Интерпретировать такое поведение зависимости амплитуды виброперемещения мембраны от объема газоразрядной камеры можно в рамках следующих представлений. В разрядной камере происходит формирование перепада давления, и сила избыточного давления на мембрану будет зависеть от активной площади, следовательно, и от диаметра изолятора. Таким образом, первоначальный рост интенсивности вибраций можно объяснить увеличением активной площади мембраны. Спад интенсивности можно связать с тем, что избыточное давление распределется на большую площадь поверхности, и сила, действующая на мембрану, уменьшается. Кроме того, колебания мембраны возбуждаются ввиду взаимодействия с акустическими волнами, отраженными от поверхностей электродной системы. В случае, когда частоты переотражений совпадают с собственными частотами мембраны, происходит возбуждение ее резонансных колебаний.

Практический интерес представляет определение диапазона конструкционных параметров, при которых ГЭАП имеет наиболее широкую полосу и большую мощность излучения. В ходе исследования определен диапазон объемов разрядной камеры от 250 до 500 мм^3 , который является оптимальным с точки зрения получения наибольшей амплитуды сигнала виброперемещения.

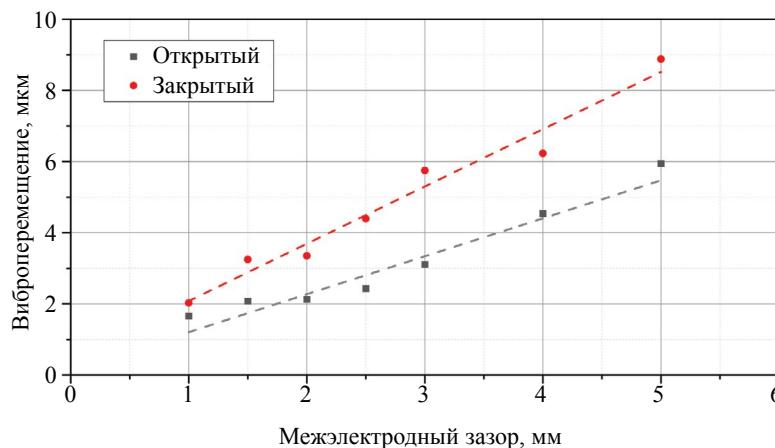


Рис. 8. Зависимость амплитуды виброперемещения в центре дюралюминиевой мембраны с отверстием 3 мм от межэлектродного зазора ГЭАП.

Далее, в ходе исследования определена зависимость амплитуды виброперемещения в центре мембраны от величины зазора межэлектродного промежутка ГЭАП. Межэлектродный зазор изменяли от 1 до 5 мм за счет использования изоляторов с различной высотой. Регистрация виброперемещения мембраны во времени осуществлялась лазерным виброметром. Полученная зависимость представлена на рис. 8.

Из полученных результатов следует, что увеличение межэлектродного зазора ГЭАП приводит к увеличению амплитуды виброперемещения в центре мембраны. Это объясняется тем, что при увеличении межэлектродного зазора возрастает уровень пробивного напряжения и энергия, передаваемая от разряда в импульсе. Примечательно, что амплитуда виброперемещения практически пропорциональна энергии, запасенной в емкостном накопителе на момент пробоя газоразрядного промежутка. Таким образом, за счет изменения межэлектродного зазора можно регулировать мощность излучения ГЭАП и задавать амплитуду виброперемещения излучающей поверхности. При величине межэлектродного зазора 5 мм уровень звукового давления в диапазоне частот до 8 кГц, измеренный на расстоянии 0,5 м от мембраны, достигал 75 дБ для ГЭАП открытого типа и 55 дБ для закрытого.

3.4. Применение ГЭАП в задачах неразрушающего контроля

Для выявления особенностей, возникающих при использовании ГЭАП открытого и закрытого типов в задачах дефектоскопии, проведены тестовые эксперименты с модельным дефектом в полимерном материале. В качестве образца для экспериментов использовалась пластина из полиметилметакрилата (ПММА) размером 214×60×4 мм³ с модельным дефектом в виде несквозного прямоугольного отверстия размером 15,0×14,6 мм, расположенным в центре. Глубина отверстия составляла 3,5 мм. В ходе эксперимента ГЭАП размещали с обратной стороны пластины на расстоянии 10 мм от ее поверхности, как показано на рис. 9.

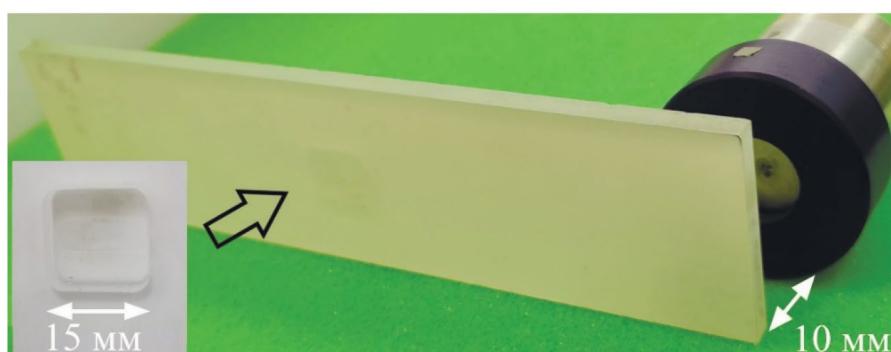


Рис. 9. Расположение ГЭАП и исследуемого образца с модельным дефектом в ходе эксперимента.

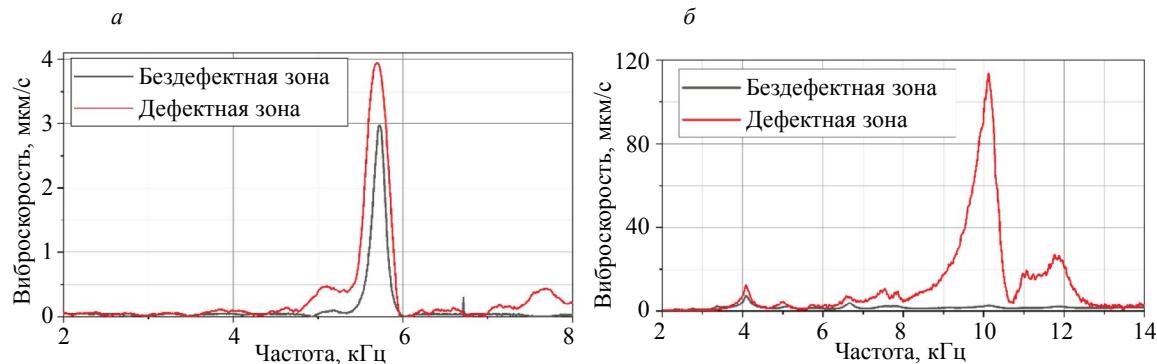


Рис. 10. Амплитудно-частотные спектры колебаний образца в области дефекта и бездефектной зоне, зарегистрированные с использованием ГЭАП закрытого (а) и открытого (б) типов.

При проведении неразрушающих испытаний пластина ПММА подвергалась бесконтактной импульсной акустической стимуляции с использованием ГЭАП. Частота следования импульсов разряда составляла 2,5 Гц. Величина зазора межэлектродного промежутка составила 5 мм. В результате лазерного вибросканирования в диапазоне частот до 50 кГц были получены амплитудно-частотные спектры колебаний пластины с шагом 5 Гц. Шаг сканирования составил 0,9 мм. На рис. 10 приведены усредненные амплитудно-частотные спектры колебаний всей пластины (бездефектная зона) и дефектной зоны, зарегистрированные при использовании ГЭАП закрытого (рис. 10а) и открытого (рис. 10б) типов.

При возбуждении упругих волн в образце с использованием ГЭАП закрытого типа (см. рис. 10а), колебания самой пластины и дефекта наблюдаются на одной частоте около 5,7 кГц. Это означает, что селективной резонансной стимуляции колебаний в области дефекта не происходит. Увеличение амплитуды сигнала по сравнению с бездефектной зоной происходит за счет локального снижения жесткости материала в области дефекта, что можно обнаружить при детальном анализе соответствующих виброграмм. Виброграмма, приведенная на рис. 11, отображает повышение амплитуды колебаний в области модельного дефекта.

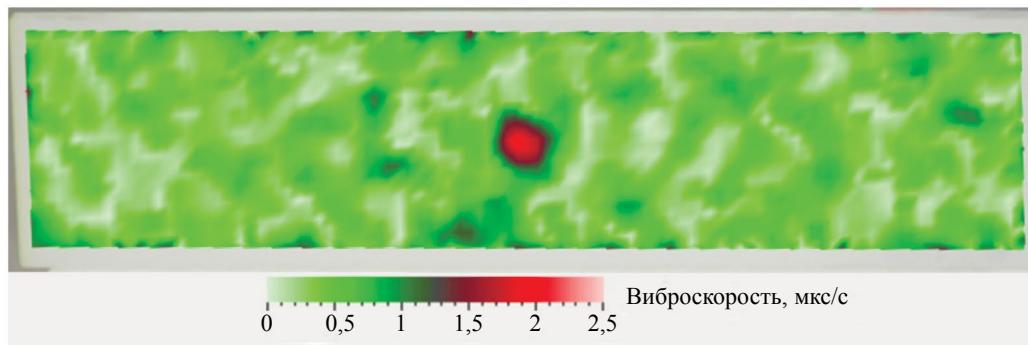


Рис. 11. Виброграмма, полученная при акустической стимуляции с использованием ГЭАП закрытого типа на частоте 9,8 кГц.

Амплитуда виброскорости в области дефекта на частоте 9,8 кГц не превышает 3 мкм/с при среднем значении сигнала в бездефектной области на уровне 0,35 мкм/с. Отношение сигнал/шум, определенное на основе полученных данных, относительно невелико и составляет 2. Такая ситуация типична для случаев, когда для акустической стимуляции дефектов в задачах НК применяют резонансные излучатели.

При анализе спектра колебаний образца, полученного с использованием ГЭАП открытого типа (см. рис. 10б), выявлены множественные спектральные линии, относящиеся к собственным частотам колебаний образца, а также выраженный пик на частоте 10,13 кГц, свидетельствующий о наличии резонансных явлений в области несквозного отверстия. Увеличение амплитуды сигнала в области дефекта по сравнению с бездефектной зоной происходит за счет

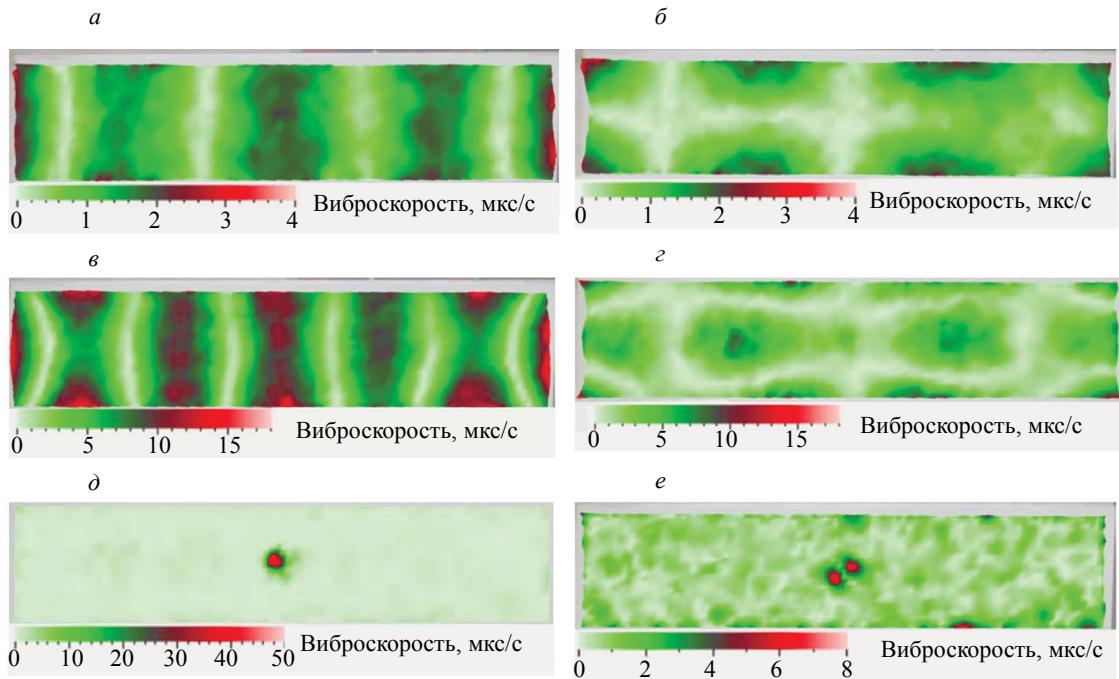


Рис. 12. Виброграммы пластины ПММА при акустической стимуляции с использованием ГЭАП открытого типа, зарегистрированные на собственных частотах колебаний пластины: 1681 Гц (а); 2356 Гц (б); 4094 Гц (в); 6656 Гц (г), а также резонансных частотах дефекта 10062 Гц (д); 20519 Гц (е).

возбуждения локального резонанса дефекта [11]. Данное явление происходит ввиду наличия в спектре сигнала возбуждения частот, совпадающих с основной частотой резонанса дефекта. Очевидно, что в данном случае происходит отклик как самого образца, так и его дефекта в процессе бесконтактной акустической стимуляции с применением ГЭАП открытого типа.

Принадлежность пиков на спектре к собственным частотам колебаний образца идентифицируется при детальном анализе виброграмм. В ходе частотного анализа данных были получены соответствующие виброграммы (рис. 12), отражающие пространственное распределение амплитуды колебаний на поверхности образца.

Из рис. 12 видно, что виброграммы отображают как собственные колебания пластины ПММА, так и резонансные колебания в области модельного дефекта. На рис. 12д и рис. 12е приведены виброграммы, отображающие резонансные колебания пластины в области дефекта. В частности, на частоте около 10 кГц зарегистрированы колебания, соответствующие основной резонансной частоте дефекта (соотношение сигнал/шум составляет 90), а на частоте 20,5 кГц (соотношение сигнал/шум составляет 15) наблюдаются колебания его второй резонансной гармоники. Следовательно, при использовании ГЭАП открытого типа акустическая стимуляция осуществляется в широком диапазоне частот. При анализе данных это позволяет получить более полную информацию о размере и форме дефекта. Стоит отметить, что получение сведений о собственных частотах объекта также имеет важное практическое значение при проектировании изделий, подвергаемых внешним механическим воздействиям.

4. АНАЛИЗ ПРЕИМУЩЕСТВ И НЕДОСТАТКОВ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСКОНТАКТНЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ГЭАП ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В ходе исследования определены характеристики ГЭАП, и выявлены особенности его использования в задачах НК. Для оценки амплитуды сигнала в области дефекта (Δv_d) по отношению к бездефектной зоне (Δv_{nd}) использовано стандартное выражение для расчета отношения сигнал/шум в виде: $SNR = \frac{|\Delta v_d - \Delta v_{nd}|}{\sigma_d}$, где σ_d — стандартное отклонение Δv_{nd} [22, 23]. Результаты сравнительного анализа ГЭАП с различной конструкцией электродной системы сведены в табл. 1.

Таблица 1
Сравнительные характеристики ГЭАП открытого и закрытого типов

Параметры при межэлектродном зазоре 5 мм	ГЭАП открытого типа	ГЭАП закрытого типа
Уровень шума, дБ	74	54
Амплитуда виброперемещения на мемbrane излучателя, мкм	6	9
Амплитуда выброскорости колебаний мембранны, мм/с	50	44
Предельная частота, кГц	70	35
Активный диапазон частот, кГц	1—60	3—10
Вынос плазмы и микрочастиц	Есть	Нет
Электромагнитное излучение	Высокое	Низкое
Устойчивость к попаданию влаги	Нет	Да
Соотношение сигнал/шум при дефектоскопии	До 90	2

Преимущества ГЭАП закрытого типа заключаются в отсутствии выноса плазмы и микрочастиц из области газового разряда и малом уровне излучаемых электромагнитных помех [21]. Это может быть важно при использовании ГЭАП для неразрушающего контроля материалов и изделий с особыми требованиями к чистоте поверхности или амплитуде внешнего электрического поля. Недостатками являются относительно небольшая мощность излучения и узкий частотный диапазон.

В результате сравнительного анализа ГЭАП открытого и закрытого типов показано, что при открытом исполнении электродной системы электроакустический преобразователь имеет практически вдвое большую предельную частоту (до 70 кГц и выше) и большую интенсивность излучения (до 75 дБ на расстоянии 0,5 м от мембранны ГЭАП). Таким образом, преимущества ГЭАП открытого типа — широкий частотный диапазон и высокая мощность излучения. К недостаткам следует отнести вынос плазмы и микрочастиц из области газового разряда за пределы электродной системы, повышенный уровень излучаемых электромагнитных помех [21].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы дана характеристика газоразрядного электроакустического преобразователя (ГЭАП) как газоразрядной нагрузки. Показано, что ГЭАП функционирует на основе искрового разряда в воздухе при атмосферном давлении, однако присутствуют стадии, соответствующие поддержанию дугового разряда. В рассматриваемых конструкциях ГЭАП возможно развитие разряда по поверхности диэлектрика. При изменении межэлектродного зазора от 1 до 8 мм пробивное напряжение возрастает от 4 до 11,5 кВ. Пробой развивается при электрических полях 10—20 кВ/см. Усредненная за активную длительность импульса 1 мкс величина сопротивления искрового канала не превышает 3 Ом. В этих условиях импульсная мощность, выделяющаяся в области плазмы разряда, превышает 100 кВт.

В ходе экспериментальных исследований показано, что геометрические размеры электродной системы ГЭАП в значительной степени определяют его акустическую характеристику. В частности, от зазора зависит амплитуда вибраций на поверхности мембранны преобразователя. Изменение объема разрядной камеры оказывает значительное влияние на акустическую характеристику ГЭАП. Определен диапазон объемов газоразрядной камеры ($250—500 \text{ mm}^3$), в котором достигается максимальная интенсивность излучения.

Проведен сравнительный анализ ГЭАП закрытого и открытого типов. На примере исследования образца полимерного материала с модельным дефектом показано, что при использовании ГЭАП закрытого типа не происходит селективной стимуляции колебаний в области дефекта. Тем не менее дефектные области можно обнаружить при детальном анализе соответствующих вибrogramм, если за счет локального снижения жесткости материала в области дефекта происходит достаточное увеличение амплитуды сигнала по сравнению с бездефектной зоной. При использовании ГЭАП открытого типа для возбуждения акустических волн в исследуемых образцах проявляются как их собственные частоты, так и резонансные частоты дефектов. Причем, отношение сигнал/шум в области модельного дефекта достигает 90 при размещении ГЭАП на расстоянии 10 мм от контролируемого изделия.

Выявлены особенности, возникающие при использовании ГЭАП открытого и закрытого типов в задачах дефектоскопии. В частности, ГЭАП открытого типа является достаточно мощным широкополосным источником звуковых и ультразвуковых колебаний и представляет интерес для бесконтактной акустической стимуляции материалов и изделий при неразрушающем контроле. Но ГЭАП закрытого типа имеет преимущества в задачах неразрушающего контроля материалов и изделий с особыми требованиями к чистоте поверхности или величине прикладываемого внешнего электрического поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания «Наука», проект № FSWW-2023-0019, в работе применяли оборудование ЦКП НОИЦ «Наноматериалы и нанотехнологии ТПУ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Круглена A.II. Неразрушающий контроль в аэрокосмической промышленности / Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3 томах. Под ред. Ю. Ю. Логинова. ФГБОУ ВО « СибГУ им. М.Ф. Решетнева». Т. 2. Красноярск. 2021. С. 813—815.
2. Щербаков М.И. Новые аспекты использования теплового неразрушающего контроля для различных объектов авиационной промышленности / Материалы III отрасл. конф. по измерит. технике и метрологии для исследований летательных аппаратов. Жуковский: ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, 2018. С. 381—386.
3. Вешкин Е.А., Самдинов Р.А., Баранников А.А. Современные материалы для салона самолета // Труды ВИАМ. 2021. № 9 (103). С. 33—42.
4. Сагомонова В.А., Долгополов С.С., Целикин В.В., Сорокин А.Е. Исследование влияния интегрированного вибропоглощающего слоя на свойства композитных трехслойных звукотеплоизолирующих сэндвич-панелей // Труды ВИАМ. 2020. № 9 (91). С. 87—95.
5. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Шакурова Р.З. Обзор современных керамических ячеистых материалов и композитов, применяемых в теплотехнике // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2023. № 1. С. 82—104.
6. Медведский А.Л., Мартirosов М.И., Хомченко А.В., Дедова Д.В. Исследование напряженно-деформированного состояния трехслойной панели с сотовым заполнителем при наличии внутренних дефектов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. № 2. С. 675—684.
7. Юмашев В.М., Кузелев Н.Р., Маклашевский В.Я. Комплексный радиационный контроль изделий, слоистых и композитных материалов в промышленности, авиационной и космической технике // Контроль. Диагностика. 2001. № 5. С. 35—36.
8. Wandowski T., Mindykowski D., Kudela P., Radzienki M. Damage localization using contact and non-contact narrow frequency band elastic wave generation // Measurement. 2023. V. 221. Article number 113504.
9. Lan Z., Saito O., Okabe Y. An insight on local defect resonance based on modal decomposition analysis: A two-dimensional case // Journal of Sound and Vibration. 2024. V. 596. Article number 118718.
10. Seresini T., Sunetchieva S., Pfeiffer H., Pfeiffer H., Glorieux Ch. Defect Detection in Carbon Fiber-Reinforced Plate by Imaging of Mechanical Nonlinearity-Induced Sideband Vibrations // Vibration. 2023. V. 6. Is. 4. P. 796—819.
11. Solodov I., Kreutzbrück M. Local defect resonance of a through-thickness crack // Ultrasonics. 2021. Is. 118 (21). P. 106565. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106565
12. Solodov I., Kreutzbrück M. Mode matching to enhance nonlinear response of local defect resonance // Journal of Sound and Vibration. 2019. V. 461. P. 114916.
13. Segers J., Hedayatrasa S., Poelman G., Paeppegem W.V., Kersemans M. Nonlinear local wave-direction estimation for in-sight and out-of-sight damage localization in composite plates // NDT & E International. 2021. V. 119. P. 102412.
14. Segers J., Hedayatrasa S., Poelman G., Paeppegem W.V., Kersemans M. Robust and baseline-free full-field defect detection in complex composite parts through weighted broadband energy mapping of mode-removed guided waves // Mechanical Systems and Signal Processing. 2021. V. 151. P. 107360.
15. Ultrasonic transducers, Technical notes / Olympus NDT. 2006.
16. Schiller S., Hsieh C.K., Chou C., Khuri-yakub B. Novel high frequency air transducers // Review of progress in quantitative NDE. 1990. P. 795.
17. Wang X.-Ch., Bai J.-X., Zhang T.-H., Sun Y., Zhang Y.-T. Comprehensive study on plasma chemistry and products in pulsed discharges under Martian pressure // Vacuum. 2022. V. 203. Article number 111200.
18. Daschewski M., Kreutzbrück M., Prager J., Dohse E., Gaal M., Harrer A. Resonanzfreie Messung und Anregung von Ultraschall // Technisches Messen. 2015. V. 82. Is. 3. P. 156—66.
19. Derusova D.A., Vavilov V.P., Nekhoroshev V.O., Shpil'noi V.Yu., Druzhinin N.V. Features of Laser-Vibrometric Nondestructive Testing of Polymer Composite Materials Using Air-Coupled Ultrasonic Transducers // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. P. 1060—1071.
20. Derusova D.A., Nekhoroshev V.O., Shpil'noi V.Y., Vavilov V.P. Developing novel gas discharge emitters of acoustic waves in air for nondestructive testing of materials // Sensors. 2022. V. 22. Is. 23. No. 99056. P. 14.

21. Derusova D.A., Vavilov V.P., Nekhoroshev V.O., Shpil'noi V.Y., Zuza D.A., Kolobova E.N. Analysis and NDT Applications of a Gas Discharge Electroacoustic Transducer // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2024. V. 60. Is. 2. P. 119—131.
22. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: Спектр, 2009. 544 с.
23. Li W., Van Gool L., Chen L., Xu D. Visual recognition in rgb images and videos by learning from rgb-d data // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2018. V. 40. Is 8. P. 2030—2036.

REFERENCES

1. Kruglenya A.I. Non-destructive testing in the aerospace industry / Collection of materials of the VII International scientific and practical conference dedicated to Cosmonautics Day. In 3 volumes. Ed. Yu. Yu. Loginov; FGBOU VO "SibSU named after M.F. Reshetnev". V. 2. Krasnoyarsk. 2021. P. 813—815. (In Russ.)
2. Shcherbakov M.I. New aspects of using thermal non-destructive testing for various objects of the aviation industry / Proceedings of the III industry conf. on measuring technology and metrology for aircraft research. Zhukovsky: TsAGI named after N.E. Zhukovsky, 2018. P. 381—386. (In Russ.)
3. Veshkin E.A., Satdinov R.A., Barannikov A.A. Modern materials for aircraft interior // Proceedings of VIAM. 2021. V. 9. Is. 103. P. 33—42. (In Russ.)
4. Sagomonova V.A., Dolgopolov S.S., Tselikin V.V., Sorokin A.E. Study of the influence of an integrated vibration-absorbing layer on the properties of composite three-layer sound-and-heat-insulating sandwich panels // Proceedings of VIAM. 2020. V. 9. Is. 91. P. 87—95. (In Russ.)
5. Solovieva O.V., Soloviev S.A., Shakurova R.Z. Review of modern ceramic cellular materials and composites used in heat engineering // News of universities. Problems of energy. 2023. V. 1. P. 82—104. (In Russ.)
6. Medvedskiy A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V., Dedova D.V. Study of the stress-strain state of a three-layer panel with a honeycomb core in the presence of internal defects // Bulletin of Tula State University. Technical sciences. 2022. V. 2. P. 675—684. (in Rus.)
7. Yumashev V.M., Kuzelev N.R., Maklashevsky V.Ya. Integrated radiation control of products, layered and composite materials in industry, aviation and space technology // Control. Diagnostics. 2001. V. 5. P. 35—36. (In Rus.)
8. Wandowski T., Mindykowski D., Kudela P., Radzienki M. Damage localization using contact and non-contact narrow frequency band elastic wave generation // Measurement. 2023. V. 221. Article number 113504.
9. Lan Z., Saito O., Okabe Y. An insight on local defect resonance based on modal decomposition analysis: A two-dimensional case // Journal of Sound and Vibration. 2024. V. 596. Article number 118718.
10. Seresini T., Sunetchiieva S., Pfeiffer H., Pfeiffer H., Glorieux Ch. Defect Detection in Carbon Fiber-Reinforced Plate by Imaging of Mechanical Nonlinearity-Induced Sideband Vibrations // Vibration. 2023. V. 6. Is. 4. P. 796—819.
11. Solodov I., Kreutzbrück M. Local defect resonance of a through-thickness crack // Ultrasonics. 2021. Is. 118 (21). P. 106565. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106565
12. Solodov I., Kreutzbrück M. Mode matching to enhance nonlinear response of local defect resonance // Journal of Sound and Vibration. 2019. V. 461. P. 114916.
13. Segers J., Hedayatrasa S., Poelman G., Paeppegem W.V., Kersemans M. Nonlinear local wave-direction estimation for in-sight and out-of-sight damage localization in composite plates // NDT & E International. 2021. V. 119. P. 102412.
14. Segers J., Hedayatrasa S., Poelman G., Paeppegem W.V., Kersemans M. Robust and baseline-free full-field defect detection in complex composite parts through weighted broadband energy mapping of mode-removed guided waves // Mechanical Systems and Signal Processing. V. 151. 2021. P. 107360.
15. Ultrasonic transducers, Technical notes / Olympus NDT. 2006.
16. Schiller S., Hsieh C.K., Chou C., Khuri-yakub B. Novel high frequency air transducers // Review of progress in quantitative NDE. 1990. P. 795.
17. Wang X.-Ch., Bai J.-X., Zhang T.-H., Sun Y., Zhang Y.-T. Comprehensive study on plasma chemistry and products in pulsed discharges under Martian pressure // Vacuum. 2022. V. 203. Article number 111200.
18. Daschewski M., Kreutzbrück M., Prager J., Dohse E., Gaal M., Harrer A. Resonanzfreie Messung und Anregung von Ultraschall // Technisches Messen. 2015. V. 82. Is. 3. P. 156—66.
19. Derusova D.A., Vavilov V.P., Nekhoroshev V.O., Shpil'noi V.Yu., Druzhinin N.V. Features of Laser-Vibrometric Nondestructive Testing of Polymer Composite Materials Using Air-Coupled Ultrasonic Transducers // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. P. 1060—1071.
20. Derusova D.A., Nekhoroshev V.O., Shpil'noi V.Y., Vavilov V.P. Developing novel gas discharge emitters of acoustic waves in air for nondestructive testing of materials // Sensors. 2022. V. 22. Is. 23. No. 99056. P. 14.
21. Derusova D.A., Vavilov V.P., Nekhoroshev V.O., Shpil'noi V.Y., Zuza D.A., Kolobova E.N. Analysis and NDT Applications of a Gas Discharge Electroacoustic Transducer // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2024. V. 60. Is. 2. P. 119—131.
22. Vavilov V.P. Infrared thermography and thermal control. Moscow: Spektr, 2009. 544 p. (In Russ.)
23. Li W., Van Gool L., Chen L., Xu D. Visual recognition in rgb images and videos by learning from rgb-d data // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2018. V. 40. Is 8. P. 2030—2036.

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ЛИСТОВ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА НА ПРОХОЖДЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ

© 2024 г. О.В. Муравьева^{1,2,*}, Л.А. Денисов¹, О.П. Богдан¹, А.В. Блинова¹

¹Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова,
Россия 426069 Ижевск, ул. Студенческая, 7

²Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
Россия 426067 Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34
E-mail: *pmkk@istu.ru

Поступила в редакцию 20.10.2024; после доработки 25.10.2024

Принята к публикации 25.10.2024

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния поверхностной плотности тонкого пористого листа термомасширенного графита на коэффициент прозрачности для акустической волны. Доказана возможность применения теории тонких пленок для описания процессов прохождения акустических волн через пористые листовые среды в области низких частот и малых толщин. Проведена оценка влияния рабочей частоты на чувствительность коэффициента прозрачности к поверхностной плотности листа.

Ключевые слова: термомасширенный графит, плотность листа, акустический коэффициент прозрачности, теория тонких пленок, чувствительность.

THE INFLUENCE OF THE SURFACE DENSITY OF THERMALLY EXPANDED GRAPHITE SHEETS ON THE ACOUSTIC WAVE TRANSMISSION

© 2024 O. V. Muravieva^{1,2,*}, L. A. Denisov¹, O. P. Bogdan¹, A. V. Blinova¹

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia 426069 Izhevsk, Studencheskaya St., 7

²Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Russia, Udmurt Republic, 426067 Izhevsk, Tatiana Baramzina str., 34
E-mail: *pmkk@istu.ru

The paper presents the results of experimental and theoretical studies of the influence of the surface density of a thin porous sheet of thermally expanded graphite on the transmission coefficient of the acoustic wave. The possibility of using the theory of thin films to describe the processes of transmission of acoustic waves through porous sheet in the field of low frequencies and small thicknesses has been proven. The influence of the operating frequency on the sensitivity of the transmission coefficient to the surface density of the sheet was assessed.

Keywords: thermally expanded graphite, surface density of a sheet, the acoustic transmission coefficient, the theory of thin films, sensitivity.

DOI: 10.31857/S0130308224120047

ВВЕДЕНИЕ

Многие пористые материалы (порометаллы, пенорезины, пенополиуретаны, полиолефины, дисперсионные композиты, ауксетические пены, волокнистые структуры и др.) благодаря своим уникальным физическим свойствам являются стратегически важными материалами, нашедшими широкое применение в различных областях промышленности (строительство, топливная и атомная энергетика, нефтегазовая и химическая промышленность, приборостроение, экология и медицина).

Исследование физических свойств пористых материалов, в том числе в условиях внешних воздействий, позволяет расширить области их применения. Множество исследований физических свойств пористых материалов направлено на изучение их акустических характеристик, таких как скорость звука [1, 2], рассеяние акустической волны [3] и звукопоглощения [4—6], коэффициенты отражения и прохождения [7, 8], диаграмм направленности при взаимодействии с порами [3, 9]. Знание акустических характеристик позволяет оценить плотность [10, 11], инерционные и упругие свойства [2, 12], пористость, средний размер и извилистость пор [13], адсорбцию [14], эффективные упругие модули [15] и другие свойства.

Теория распространения акустических волн в пористых средах использует преимущественно уравнения Био [1, 16]. С использованием теории Био решаются задачи распространения акустических волн как в водонасыщенных, так и газонасыщенных пористых средах. На

основе теории Био в [17] предложена модель и проанализированы особенности распространения поверхностных волн в пористо-упругих материалах типа изолон и вспененный полиуретан со свободной границей. Имеется множество работ, дополняющих и обобщающих теорию Био: для сред с большими значениями пористости [18], для сред с бесконечной пористостью [19], для флюида в виде пузырьковой жидкости [20], для гидратосодержащих пористых образцов [2], материалов свойствами с двойной пористостью [5], при влиянии эффекта смачивания [21] и др.

Отдельный интерес представляет область теоретических исследований акустических характеристик пористых сред, основанных на моделировании распространения акустических волн. При моделировании наряду с теорией Био используются различные подходы, методы и модели, такие как аналитические методы Делани—Базли, Гарай—Помпол [4], метод двухмасштабной асимптотической гомогенизации [22], модель прогнозирования Джонсона, Шампу, Алларда и Лафаржа [13], метод итерационной регуляризации [23], позволяющие с различной долей приближения оценить и спрогнозировать акустические свойства пористых сред (скорость звука, коэффициенты прохождения и отражения, звукопоглощения, и т.п.).

В последнее время большое количество исследований посвящено исследованиям акустических волн в метаматериалах [6, 9, 12]. Отмечается [12], что для дисперсного композита в определенных частотных диапазонах пористая среда приобретает свойства метаматериала с отрицательным преломлением звука. При исследованиях акустических свойств пористой пены из оксида графена наблюдаются отрицательное значение деформации и медленная скорость звука, демонстрирующие наличие акустических структур [6].

Следует отметить, что большинство исследований акустики пористых материалов посвящено вопросам распространения акустических волн в неограниченных и полубесконечных средах [24]. Многие из используемых на сегодняшний день пористых материалов представляют собой лист или слоистую среду. Поэтому интерес представляют вопросы распространения акустических волн в слоях и слоистых средах [8, 25, 26]. В работах [7, 25] исследуется взаимодействие звукового импульса с пористым слоем конечной толщины, в том числе при наклонном падении. Работа [26] посвящена моделированию распространения упругих волн в слоистом композите при наличии отслоений. Вопросам экспериментальной оценки коэффициента прохождения и его неравномерности по площади для пористых листов полиолефинов посвящены работы [10, 11].

Исследуемый в работе листовой терморасширенный графит (ТРГ) представляет собой углеродный термически стойкий инертный материал со сложной пористой анизотропной структурой [27], обладающий малым весом, высокими механическими свойствами, регулируемой теплопроводностью, высокой электропроводностью и удельной емкостью. Технология изготовления листов ТРГ включает интеркалирование графита с последующим термо воздействием и приданием конечной формы путем прессования или проката [28]. Одной из важнейших характеристик листов ТРГ при изготовлении является плотность, которая зависит от технологии получения и назначения изделия. Одним из основных дефектов, возникающих при прокатке, является разноплотность листа как в направлении прокатки, так и по ширине листа [28].

В [29] представлены результаты исследования чувствительности акустического метода контроля плотности пористых образцов терморасширенного графита, основанного на определении коэффициента прозрачности. При этом открытый остается вопрос о влиянии толщины объекта контроля, его плотности и скорости волн на поведение коэффициента прозрачности.

Цель работы: экспериментальные и теоретические исследования влияния плотности и толщины тонкого пористого листа терморасширенного графита на коэффициент прозрачности акустической волны.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментально исследованы листы терморасширенного графита в количестве 6 партий различной толщины h в диапазоне от 0,2 до 1,5 мм, с различной плотностью в каждой партии общим количеством 28 образцов. Плотность и толщина листа определяются различиями в технологии их изготовления (количество насыпного материала и степень его деформации). Объекты были подготовлены и предоставлены изготовителем листов ТРГ (ООО «Силур»). Характеристики исследованных листов терморасширенного графита (толщина h , плотность ρ и поверхностная плотность ρh) представлены в табл. 1.

При исследованиях использована методика оценки коэффициента прохождения акустических волн через пористые листовые материалы, основанная на использовании низкочастотного амплитудно-теневого метода (Патент № 2796231). Методика реализована на базе установки для контроля пористых материалов, входящей в состав уникальной научной установки (УНУ) «Ин-

Таблица 1

Характеристики образцов ТРГ

№ образца	h , мм	ρ , кг/м ³	ρh , кг/м ²	№ образца	h , мм	ρ , кг/м ³	ρh , кг/м ²
1	1,5	643	0,96	15	0,6	722	0,43
2		709	1,06	16		911	0,55
3		1147	1,72	17		1131	0,68
4	1,0	802	0,80	18		1196	0,72
5		1017	1,02	19		1523	0,91
6		1139	1,14	20		1543	0,93
7		1189	1,19	21	0,4	1076	0,43
8		1336	1,36	22		1225	0,49
9	0,8	764	0,61	23		1315	0,53
10		895	0,72	24	0,2	938	0,19
11		1044	0,84	25		994	0,20
12		1084	0,87	26		1034	0,21
13		1142	0,91	27		1405	0,28
14		1509	1,21	28		1468	0,29

формационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий”, и бесконтактных акустических пьезопреобразователей. Акустические преобразователи обеспечивают эффективное излучение и прием волн через воздух за счет эффекта изгибных колебаний пьезопластин, согласование которых с низким импедансом воздуха — наилучшее. Блок-схема и фото экспериментальной установки представлены на рис. 1.

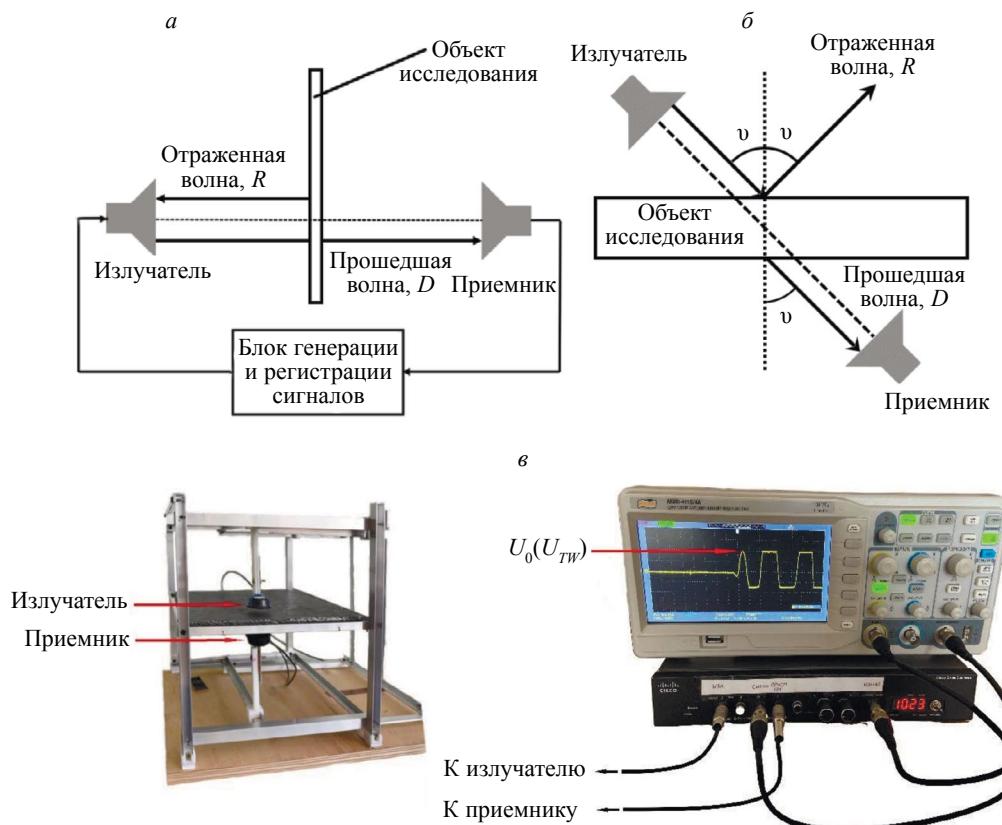


Рис. 1. Схема определения коэффициента прозрачности по нормали (а) и под углом к поверхности (б); фото установки (в).

Основным информативным параметром при исследованиях является амплитуда первого периода импульса как наиболее устойчивого с точки зрения влияния нерегулярных переотражений. Результаты исследования листов ТРГ с использованием предложенной методики показали, что указанный параметр чувствителен к изменению плотности и толщины объекта исследования и может быть позиционирован как методика оценки количества вещества [29].

Основные технические характеристики установки представлены в табл. 2.

Таблица 2
Основные технические характеристики экспериментальной установки

Характеристика	Значение
Количество каналов	6
Рабочий диапазон частот	5—15 кГц
Амплитуда зондирующего импульса	15 В, 30 В, 45 В
Частота следования зондирующих импульсов	2 Гц
Коэффициент усиления	30—1000
Общий потребляемый ток	25 мА
Электропитание установки	+5 В
Погрешность измерения	± 3 отн.ед.

Коэффициент прохождения D определяется согласно формуле:

$$D = \frac{U_{TW}}{U_0} \times 100 \%, \quad (1)$$

где U_{TW} — амплитуда волны, прошедшей через лист ТРГ; U_0 — амплитуда волны, прошедшей по воздуху (в отсутствии объекта).

Для оценки влияния перекоса объекта контроля относительно направления ультразвукового луча исследовано влияние угла ввода на коэффициент прохождения акустической волны согласно схеме (рис. 1б).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рис. 2 иллюстрирует семейство кривых, описывающих влияние плотности исследованных образцов листов ТРГ различной толщины на коэффициент прозрачности. Закономерно уменьшение коэффициента прозрачности как с увеличением плотности, так и с увеличением толщины листа. Степень влияния плотности (крутизна кривых) снижается по мере увеличения толщины листа. При этом совместный учет влияния обоих параметров на коэффициент прозрачности не представляется возможным.

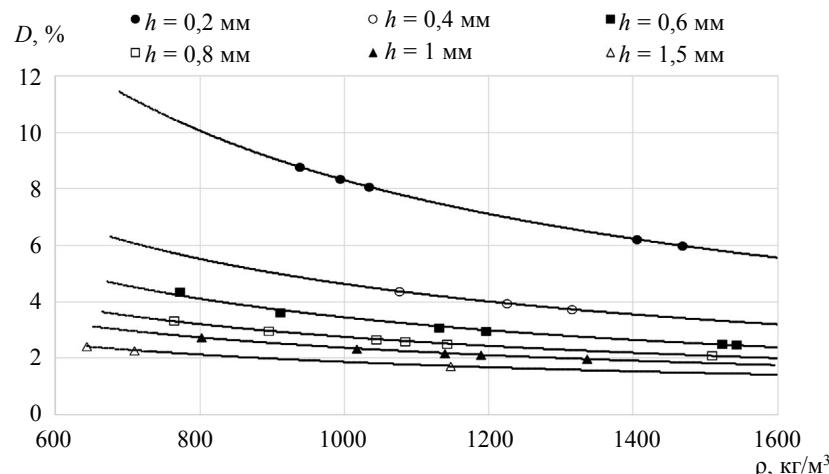


Рис. 2. Экспериментальные зависимости коэффициента прозрачности от плотности листа при его различной толщине.

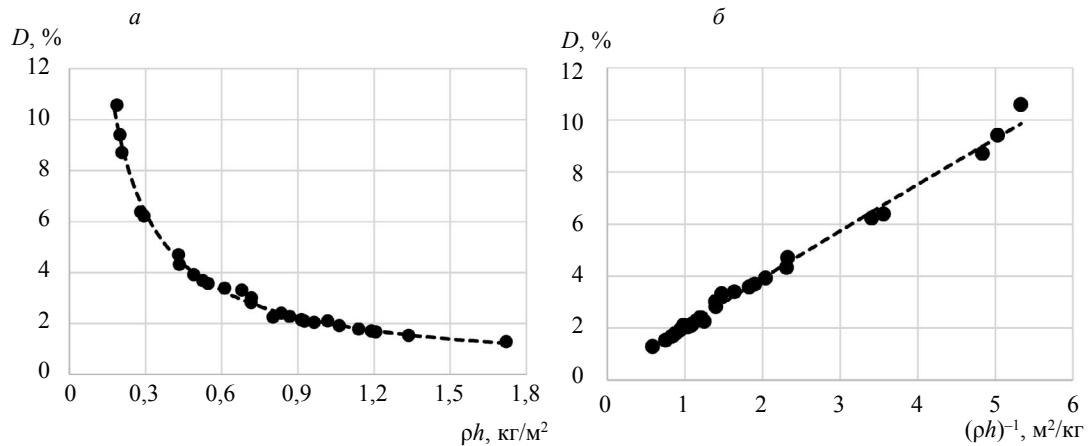


Рис. 3. Экспериментальная зависимость коэффициента прозрачности от поверхностной плотности (*a*); от обобщенного параметра (*б*).

Введем вспомогательную обобщенную характеристику листа, определяемую произведением плотности образца на его толщину, или его поверхностную плотность ρh . Результаты исследования коэффициентов прозрачности для 28 образцов показали наличие однозначной обратнопропорциональной зависимости от произведения плотности образца на его толщину или его “поверхностной плотности” ρh (рис. 3 $а$). Полученные зависимости могут быть преобразованы в линейные зависимости коэффициента прозрачности от обобщенного параметра $(\rho h)^{-1}$ (рис. 3 $б$).

Видно, что изменение поверхностной плотности примерно в 10 раз (с 0,19 до 1,72 kg/m^2) ведет к кратному уменьшению коэффициента прозрачности (с 10,6 до 1,3 %).

Результаты исследования влияния угла наклона акустической оси относительно плоскости образца (рис. 4) показали, что в диапазоне изменения углов от 0 до 50 град коэффициент прозрачности меняется на 53 % для образца № 1 и на 59 % для образца № 3. При этом на малых углах (до 10 град) влияние угла менее существенно (3 % для образца № 1 и 5 % для образца № 3).

На поведение кривой коэффициента прозрачности оказывают влияние два основных фак-

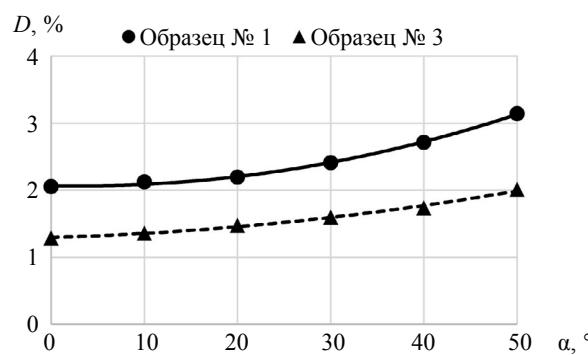


Рис. 4. Экспериментальные зависимости коэффициента прозрачности от угла ввода для образцов № 1 и № 3.

тора. С одной стороны, коэффициент прозрачности уменьшается за счет увеличения рассогласования по акустическому импедансу материала объекта контроля и окружающей его среды (воздух). С другой стороны, имеет место ослабление акустической волны вследствие затухания в слое, тем большее, чем выше пористость (меньше плотность среды).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Следует отметить, что при распространении акустической волны сквозь пористый материал происходит диссипация энергии, обусловленная ее взаимодействием с порами. Согласно [30], пористый материал ведет себя как сплошная среда, к которой могут быть применены методы

механики сплошных сред, если длина акустической волны, распространяющейся в нем, существенно превышает средние размеры пор в образцах. Микроскопические исследования структуры листов терморасширенного графита [31] показали, что площадь сечения пор в ТРГ не превышает 60 мкм^2 (размеры пор в направлении прозвучивания не более 10 мкм), при этом длина акустической продольной волны в диапазоне исследуемых частот составляет $20—100 \text{ мм}$. Учитывая сказанное, лист ТРГ можно рассматривать как однородную пористую среду с равномерно распределенными плотностью, определяемой пористостью среды, и скоростью волн.

В отличие от теории Zoepritz—Knott, описывающей поведение коэффициентов отражения и прозрачности при падении плоской волны на границу раздела двух полубезграничных сред в условиях использования низкочастотного акустического диапазона ($5—15 \text{ кГц}$), лист ТРГ может рассматриваться как тонкая пленка, толщина которой много меньше длины волны.

Постановка задачи о прохождении плоской волны через тонкую пленку толщиной h в общем случае наклонного падения представлена на рис. 5.

В случае наклонного падения волны из среды 1 в среду 3 через тонкий слой 2 толщиной h в

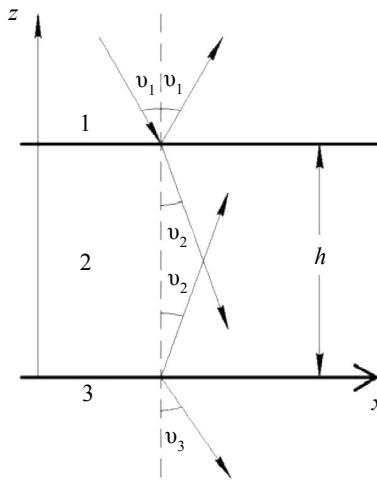


Рис. 5. Постановка задачи о прохождении плоской волны через тонкий слой.

условии отсутствия трансформации волн в слое коэффициенты отражения R_p и прозрачности D_p по давлению могут быть описаны с использованием формул Бреховских Л.Д. [32]:

$$R = \frac{(Z_1 + Z_2)(Z_2 - Z_3)\exp(-ik_{2z}h) + (Z_1 - Z_2)(Z_2 + Z_3)\exp(ik_{2z}h)}{(Z_1 + Z_2)(Z_2 + Z_3)\exp(-ik_{2z}h) + (Z_1 - Z_2)(Z_2 - Z_3)\exp(ik_{2z}h)}, \quad (3)$$

$$D = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 - Z_2)(Z_2 - Z_3)\exp(ik_{2z}h) + (Z_1 + Z_2)(Z_2 + Z_3)\exp(-ik_{2z}h)}, \quad (4)$$

где Z_j — нормальные импедансы j -й среды, определяемые отношением звукового давления к проекции колебательной скорости частиц среды на нормаль к границе слоя (под углом v_j):

$$Z_j = \frac{\rho_j C_j}{\cos v_j}, \quad (5)$$

v_j — углы падения, отражения и преломления в j -й среде, где k_{2z} — проекция волнового числа во второй среде на нормаль к границе слоя (характеризует набег фазы по толщине пластины):

$$k_{2z} = k_2 \cos v_2 = \frac{2\pi f}{C_2} \cos v_2. \quad (6)$$

При равенстве акустических импедансов сред, окружающих слой ($Z_1 = Z_3$), для случая нормального падения волны формулы (3), (4) упрощаются и приводятся к виду для коэффициентов отражения и прозрачности по энергии [33]:

$$R_I = \frac{0,25(m-1/m)^2 \sin^2(k_{2z}h)}{1+0,25(m-1/m)^2 \sin^2(k_{2z}h)}; \quad (7)$$

$$D_I = \frac{1}{1+0,25(m-1/m)^2 \sin^2(k_{2z}h)}, \quad (8)$$

где $m = \frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1}$ — соотношение акустических импедансов материала слоя и окружающей его среды (воздуха).

Согласно формулам (5)–(8), коэффициенты отражения и прозрачности являются периодическими функциями произведения $f h / C$, входящего в комплексный показатель экспоненты. Максимум коэффициента прозрачности D соответствует условию полуволнового резонанса по толщине пластины, при этом коэффициент отражения R принимает минимальное значение:

$$h = n \frac{C_2}{2f}. \quad (9)$$

Минимум коэффициента прозрачности D соответствует условию нечетного числа четвертей длин волн, при этом коэффициент отражения R принимает максимальное значение:

$$h = (2n+1) \frac{C_2}{4f}. \quad (10)$$

В качестве примера на рис. 6 представлены обобщенные зависимости абсолютных значений и фаз коэффициентов отражения и прозрачности от величины $f h$ при различных значениях скорости волны и фиксированном значении плотности $\rho = 640 \text{ г/м}^3$. Для расчетов выбран диапазон скоростей в слое от минимально возможного — 330 м/с, соответствующего скорости в образце с наибольшей пористостью (значение, близкое к воздуху), до максимально возможного — 1470 м/с, соответствующего скорости в чистом графите. Акустическое сопротивление окружающей среды (воздуха) принято равным $Z_1 = 407 \text{ кг} \cdot \text{с/м}^2$.

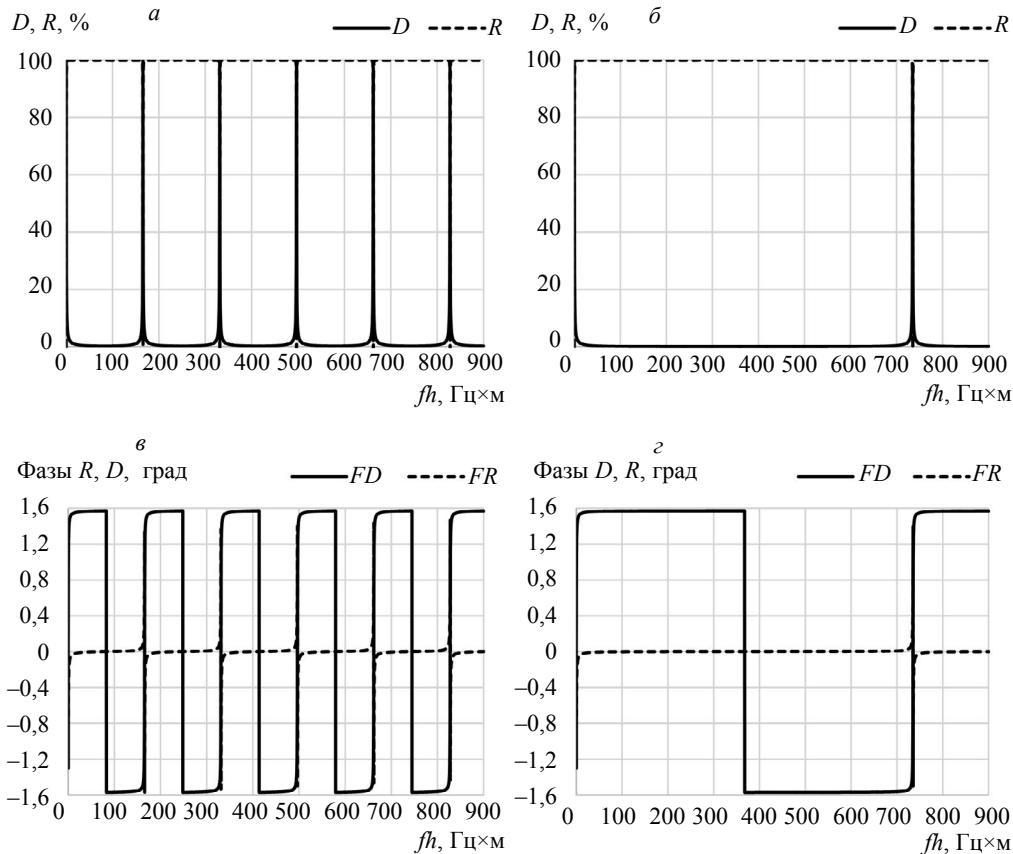


Рис. 6. Зависимость амплитуд (a, δ) и фаз (ε, ε) коэффициентов прозрачности D и отражения R от $f h$ для образца № 1 при скорости $C_2 = 330 \text{ м/с}$ (a, δ) и скорости $C_2 = 1470 \text{ м/с}$ (ε, ε).

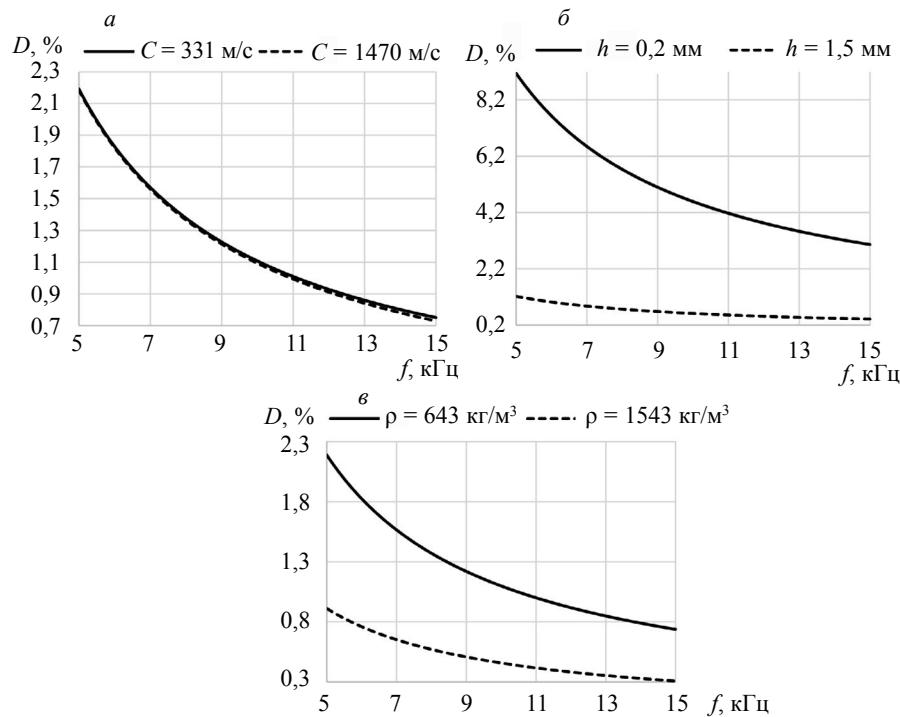


Рис. 7. Зависимость коэффициента прозрачности от частоты при изменении скорости C_l ($\rho = 643 \text{ кг}/\text{м}^3$, $h = 1,5 \text{ мм}$) (α); при изменении толщины образца ($C_l = 500 \text{ м}/\text{с}$, $\rho = 1147 \text{ кг}/\text{м}^3$) (β); при изменении плотности образца ($C_l = 500 \text{ м}/\text{с}$, $h = 1,5 \text{ мм}$) (γ).

Рассмотрим поведение кривых коэффициента прозрачности в низкочастотном диапазоне (5—15 кГц в области, где толщина листа много меньше длины волн в среде ($h \ll \lambda$)). Рис. 7 иллюстрирует раздельное воздействие каждого из параметров, влияющих на коэффициент прозрачности: скорость звука, плотность и толщина при прочих равных условиях.

Как следует из рис. 7α, изменение скорости звука в слое ТРГ в широком диапазоне значений (от скорости звука в воздухе — 330 м/с до скорости звука в чистом графите — 1470 м/с) не оказывает влияние на значение коэффициента прозрачности в области исследуемых частот (5—15 кГц) (штриховая и сплошная кривые сливаются). Расчеты показывают, что отклонение по скорости более, чем в 4 раза приводит к изменению коэффициента прозрачности не более, чем на 0,5 % во всем диапазоне исследуемых толщин и плотностей образцов. Из этого следует возможность пренебречь влиянием неизвестной (сложно определяемой) скорости звука на коэффициент прозрачности.

В общем случае скорость волн (упругие модули) в пористых средах, описываемых двухфазной системой М. Био [1], определяется рядом параметров (пористость; эффективные упругие модули насыщенного материала; упругие модули скелета; упругие модули флюида, эффективные упругие модули скелета), многие из которых являются неизвестными величинами и могут быть определены только эмпирически.

Следует отметить, что экспериментальное определение скорости продольной волны по толщине образца с высокой точностью сопряжено со сложностями реализации методики импульсного временно-теневого метода. Погрешности измерений обусловлены:

малой базой прозвучивания и неравномерностью толщины стенки листа;

невозможностью надежного позиционирования измерительного инструмента на легко деформируемой поверхности;

различиями локальной плотности (в точке измерений) от интегральной (измеренной на листе в целом) вследствие разноплотности;

совместного влияния толщины слоя закрытых пор на поверхности в сравнении с его центральной частью, что обусловлено технологией проката.

В отличие от скорости волны изменение плотности, как и изменение толщины листа ТРГ, оказывает существенное влияние на коэффициент прозрачности в исследуемом диапазоне частот (рис. 7β, γ). Так, на частоте 6,5 кГц увеличение толщины с 0,2 до 1,5 мм ведет к уменьшению коэффициента прозрачности с 7 до 1 %. Рост плотности в диапазоне значений от 643 до 1543 кг/м³ ведет к уменьшению коэффициента прозрачности с 4,2 до 1,8 % (см. рис. 7γ).

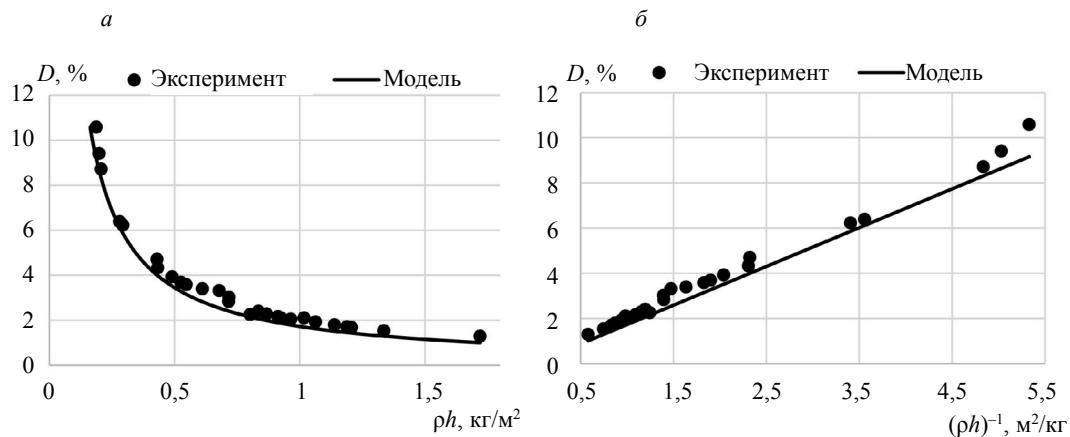


Рис. 8. Теоретическая зависимость коэффициента прозрачности от поверхностной плотности ρh (а); от $(\rho h)^{-1}$ (б).

Для оценки совместного влияния параметров плотности и толщины листа на коэффициент прозрачности введем параметр поверхностной плотности листа, определяемой произведением ρh . На рис. 8 представлена рассчитанная теоретически с использованием предлагаемой модели зависимость коэффициента прозрачности от поверхностной плотности для всех исследованных образцов на частоте, соответствующей максимуму спектральной плотности импульса прошедшей волны (6,5 кГц).

Наблюдается близкая к экспериментальной зависимость коэффициента прохождения от произведения ρh (см. рис. 3). Небольшие расхождения в области малых значений ρh обусловлены неравномерностью по плотности и толщине тонких образцов, приобретаемой при технологическом цикле производства листов ТРГ [29].

Уравнения линий тренда для теоретической и экспериментальной зависимостей коэффициента прозрачности от поверхностной плотности ρh (а) и от $(\rho h)^{-1}$ сведены в табл. 3.

Таблица 3

Уравнения линий тренда теоретических и экспериментальных зависимостей коэффициента прозрачности от ρh

Вид зависимости	Модель	R^2	Эксперимент	R^2
D от ρh	$D = 1,73 (\rho h)^{-0.99}$	0,99	$D = 2,04 (\rho h)^{-0.941}$	1
D от $(\rho h)^{-1}$	$D = 1,84 (\rho h)^{-1} + 0,2$	0,99	$D = 1,72 (\rho h)^{-1} + 0,01$	1

Достоверность полученной аппроксимации экспериментальной и теоретической зависимостей оценена с использованием критерия Фишера. При табличном значении критерия Фишера для заданного уровня значимости ($\alpha = 0,05$) и при имеющихся степенях свободы ($m = 1, n = 28$) $F_{\text{табл}} = 4,2$, при этом $F_{\text{расч}} = 639$, что говорит о достоверности полученной аппроксимации.

Следует отметить, что полученные теоретические зависимости справедливы для гармонического режима и позволяют вычислить коэффициенты прозрачности для отдельных спектральных составляющих в импульсе. В импульсном режиме формула для коэффициента прозрачности $D(f)$ (8) представляет собой передаточную амплитудно-частотную функцию процесса прохождения. При этом для расчета импульса прошедшей волны во временной области может быть использован метод интеграла Фурье.

При определении коэффициента прозрачности через тонкие листы важно оценить влияние углового перекоса листа относительно акустической оси, что определяет достоверность контроля плотности листа. С этой целью теоретически исследовано влияние угла падения α акустической волны на тонкий лист на примере двух образцов фиксированной толщины (1,5 мм) и разной плотности (643 и 1147 кг/м³). Представленные на рис. 9 зависимости коэффициента прозрачности от угла падения показывают, что значение D увеличивается с ростом угла, при этом в области малых углов изменение D не существенно (не превышает 2 % в диапазоне углов от 0 до 10 град) и более существенно для больших диапазонов углов: при угле 50 град отклонение коэффициента прозрачности может достигать 35 % от начального значения (0 град).

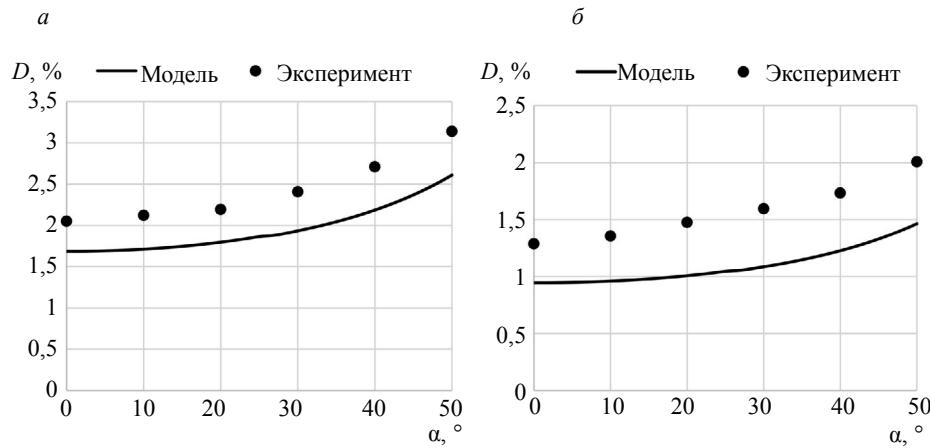


Рис. 9. Теоретическая зависимость коэффициента прозрачности от угла падения для образцов № 1 и № 3.

Завышенные в сравнении с экспериментом значения теоретических коэффициентов прозрачности, рассчитанных в гармоническом режиме для плоской волны, могут быть обусловлены влиянием импульсного режима, различием в диаграммах направленности при распространении в воздухе и через промежуточный слой, а также возможным проявлением резонансных явлений в пористом слое.

Следует иметь в виду, что при наклонном падении волны на тонкий слой возможно возникновение в слое дисперсионных волн Лэмба, которые дополнительно могут влиять на ослабление энергии в прошедшей волне [34, 35].

Предложенный подход к моделированию прохождения акустических волн через тонкие пористые среды может использоваться для оценки чувствительности коэффициента прозрачности к изменению поверхностной плотности:

$$S_{ph} = \frac{dD}{d(ph)}. \quad (11)$$

В частности, для частоты 6,5 кГц уравнение для теоретической кривой чувствительности может быть описано выражением $S_{ph} = -1,84 (ph)^{-2}$.

Зависимости чувствительности метода к изменению поверхностной плотности в различных частотных диапазонах иллюстрирует рис. 10.

При использовании обобщенного параметра $(ph)^{-1}$ чувствительность является величиной постоянной и зависит только от частоты. Влияние частоты на чувствительность коэффициента прозрачности к величине $(ph)^{-1}$ иллюстрирует рис. 11. Расчеты показывают, что для частоты 6,5 кГц чувствительность $S_{(ph)^{-1}} = -0,017 \text{ кг}/\text{м}^2$.

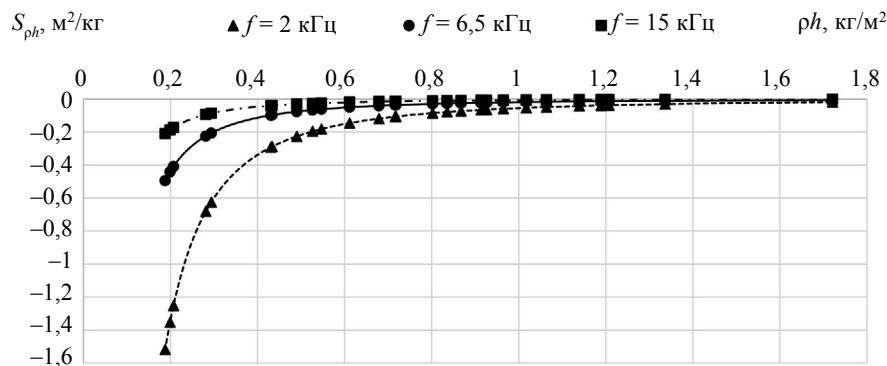


Рис. 10. Теоретическая зависимость чувствительности S_D коэффициента прозрачности к поверхностной плотности ph в различных частотных диапазонах.

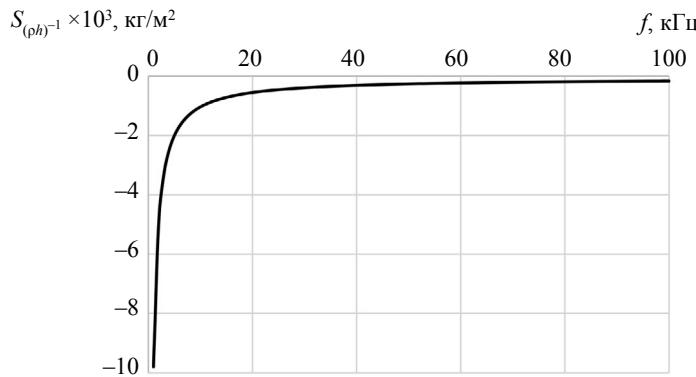


Рис. 11. Теоретическая зависимость чувствительности коэффициента прозрачности к поверхностной плотности $(\rho h)^{-1}$ от частоты.

Как следует из полученных зависимостей, чувствительность к поверхностной плотности в существенной мере определяется рабочей частотой, а также диапазоном значений ρh . На низких частотах и в области малых значений ρh наблюдается наилучшая чувствительность к поверхностной плотности, что объясняется поведением коэффициента прозрачности в области малых произведений $f h$, характеризующимся резким спадом кривой. Напротив, в области высоких частот и больших толщин чувствительность ухудшается.

Следует иметь в виду, что использование низких частот может приводить к снижению достоверности метода вследствие влияния нерегулярных переотражений в помещении и влияния низкочастотного механического шума ввиду более низкого затухания в окружающей среде и формирования более широкой диаграммы направленности. Поэтому при выборе частотного диапазона для оценки плотности следует руководствоваться компромиссом между высокой чувствительностью и влиянием мешающих факторов на низких частотах.

Результаты экспериментальных измерений коэффициента прозрачности были сопоставлены с данными по плотности, полученными в ходе верификации прямым весовым методом [29]. Толщина листа h варьировалась в диапазоне от 1,03 до 1,08 мм и плотность ρ — в диапазоне от 980 до 1130 кг/м³. Экспериментальная чувствительность к изменению по плотности относительно амплитуды сигнала эталонного в условиях линейного приближения составила:

$$S_p = \frac{\Delta U}{\Delta \rho} = 0,34 \text{ (отн.ед.} \times \text{м}^3) / \text{кг.} \quad (12)$$

Используя график зависимости коэффициента прозрачности от поверхностной плотности (см. рис. 10), для частоты 6,5 кГц найдем изменение коэффициента прозрачности ΔD (эквивалентное изменению амплитуды сигнала ΔU), соответствующее изменению поверхностной плотности ρh от 1,0 до 1,22 кг/м²: $\Delta D = 0,32$. При толщине $h = 1$ мм это изменение соответствует

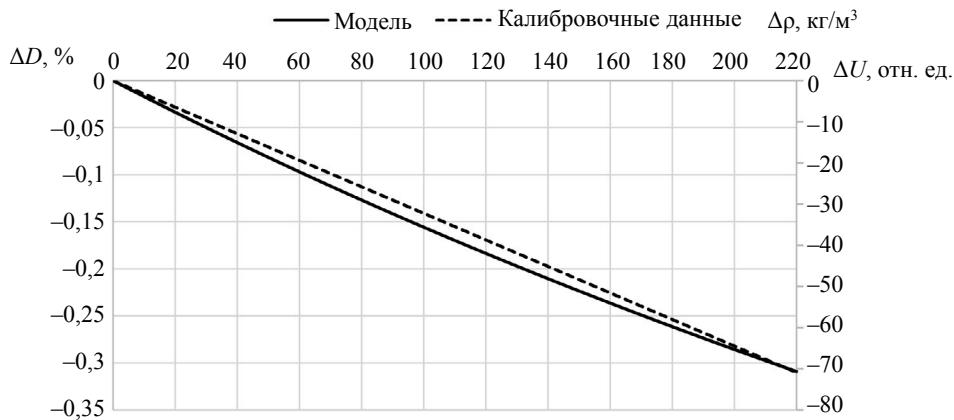


Рис. 12. Зависимости изменения амплитуды ΔU прошедшего сигнала, полученного при калибровке (формула (12)), и изменения коэффициента прозрачности ΔD , полученного при моделировании от изменения плотности $\Delta \rho$.

изменению по плотности $\Delta\rho = 211 \text{ кг}/\text{м}^3$. Зависимости изменения амплитуды ΔU прошедшего сигнала, полученного при калибровке (формула (12)), и изменения коэффициента прозрачности ΔD , полученного при моделировании, от изменения плотности $\Delta\rho$ (рис. 12) показывают идентичное поведение, что говорит о возможности использования предложенного подхода к описанию процессов прохождения акустических волн через пористые листовые среды для оценки чувствительности к изменению плотности (поверхностной плотности) образцов пористых сред любой толщины в произвольном частотном диапазоне. При этом отсутствует необходимость создания большого количества образцов, что сопряжено со сложностью технологического процесса их производства, а также проведения большого количества экспериментальных исследований на каждой из толщин с верификацией методом прямым методом взвешивания.

ВЫВОДЫ

1. Для тонких пористых листов терморасширенного графита экспериментально выявлена однозначная обратнопропорциональная зависимость коэффициента прозрачности от произведения плотности образца на его толщину (поверхностной плотности ρh), которая может быть преобразована в линейную зависимость коэффициента прозрачности от $(\rho h)^{-1}$.

2. Показана применимость теории тонких пленок для описания процессов прохождения акустических волн через пористые листовые среды в области низких частот и малых толщин.

3. С использованием теории тонких пленок теоретически исследовано влияние фактора изменения скорости, толщины слоя и его плотности на акустическую прозрачность. Показано наличие существенного влияния на коэффициент прозрачности толщины и плотности листа и отсутствие влияния на коэффициент прозрачности скорости волны, что позволяет отстроиться от влияния скорости, точное определение которой невозможно.

4. Проведена оценка влияния рабочей частоты на чувствительность коэффициента прозрачности к поверхностной плотности листа. Показано, что максимальная чувствительность наблюдается для низких частот и малых значений ρh (в области $h \ll l$).

5. Доказано, что предложенный подход к моделированию процессов прохождения акустических волн через пористые листовые среды может быть использован для оценки чувствительности и построения калибровочной зависимости для определения плотности листов ТРГ в широком диапазоне плотностей и толщин в произвольном частотном диапазоне.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 23-29-10167, <https://rscf.ru/project/23-29-10167/>, с использованием УНУ “Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий” (рег. номер: 586308).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Biot M.A. Acoustics, elasiticity, and thermodynamics of porous media: twenty-one papers*. New York: Acoustical Society of America, 1992. 265 p.
2. Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю., Дудко Д.Н. Скорость и поглощение линейных волн в пористых средах, насыщенных газом и его гидратом // Прикл. мех. техн. физ. 2022. Т. 63. № 4 (374). С. 56—63. DOI: 10.15372/PMTF20220406. EDN PXHPXI
3. Yang Q., Malcolm A., Rusmanugroho H., Mao W. Analysis of radiation patterns for optimized full waveform inversion in fluid-saturated porous media // Geophysical Journal International. 2019. V. 216. № 3. P. 1919—1937. DOI: 10.1093/gji/ggy525
4. Sivanantham M., Thyla P., Loganathan P., Sathish S. Measuring Methods of Acoustic Properties and Influence of Physical Parameters on Natural Fibers: A Review // Journal of Natural Fibers. 2019. V. 17. № 12. P. 1—20. DOI: 10.1080/15440478.2019.1598913
5. Zhao H., Wang Y., Yu D., Yang H., Zhong J., Wu F., Wen J. A double porosity material for low frequency sound absorption // Composite Structures. 2020. V. 239. 111978 p. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111978
6. Oh J.-H., Kim J.-S., Nguyen V.-H., Oh I.-K. Auxetic graphene oxide-porous foam for acoustic wave and shock energy dissipation // Composites Part B: Engineering. 2020. V. 186. 107817 p. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107817
7. Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.В. Особенности отражения акустических волн от границы или слоя двухфазной среды // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 2. С. 162—173.
8. Дмитриев В.Л., Пономарева Е.А. Распространение акустических волн в слоистых пористых средах / Труды Института механики УНЦ РАН. Уфа: Гилем, 2007. С. 169—175.
9. Jimenez N., Umnova O., Groby J.-P. Acoustic Waves in Periodic Structures, Metamaterials, and Porous Media / From Fundamentals to Industrial Applications. Topics in Applied Physics. Springer, 2021. 444 p.
10. Bogdan O.P., Zlobin D.V., Murav'eva O.V., Molin S.M., Platonov A.V. Evaluation of nonuniformity of elastic properties of sheets made from closed-cell polyolefin foams by acoustic method // Devices and Methods of Measurements. 2021. Т. 12. № 1. С. 58—66.

11. Богдан О.П., Муравьева О.В., Платунов А.В., Рысев Д.С. Исследование характеристик листов пенополиэтилена акустическими методами // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2020. Т. 23. № 2. С. 61—68. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-61-68. EDN RNJUOD.
12. Федотовский В.С. Пористая среда как акустический метаматериал с отрицательными инерционными и упругими свойствами // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 5. С. 547—553. DOI: 10.1134/S0320791918050027. EDN UWWHVP.
13. Horoshenkov K., Hurrell A., Groby J.-P. Erratum: A three-parameter analytical model for the acoustical properties of porous media // J. Acoust. Soc. Am. 2019. V. 145 (4). P. 2512—2517. DOI: 10.1121/10.0000560
14. Zhang W., Mehrabian A. Связь поромеханики и адсорбции в мультипористых твердых телах // Физ. мезомех. 2023. Т. 26. № 2. С. 43—56. DOI: 10.55652/1683-805X_2023_26_2_43. EDN LYEEKU.
15. Фоменко С.И., Джана Р.Б., Ромашин А.К. Моделирование распространения упругих волн в двухфазной пористо-упругой среде и определение эффективных модулей с помощью поверхностных волн / Математическое моделирование в естественных науках. Материалы XXXI Всероссийской школы-конференции. Пермь, 05—08 октября 2022 года. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2022. Т. 1. С. 308—310. EDN LYMNNAZ.
16. Kidner M., Hansen C. A comparison and review of theories of the acoustics of porous materials // International Journal of Acoustics and Vibrations. 2008. V. 13. P. 1—27.
17. Леньков С.В. Акустические поверхностные волны в пористо-упругих двухфазных средах // Химическая физика и мезоскопия. 2023. Т. 25. № 3. С. 375—384. DOI: 10.15350/17270529.2023.3.33. EDN PBCENE.
18. Ильясов Х.Х., Кравцов А.В., Кузнецов С.В., Секердж-Зенькович С.Я. Об особенностях акустических волн в средах с большими значениями пористости в рамках теории Био // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 6. С. 665—669. DOI: 10.7868/S0320791917060041. EDN ZIEVFB.
19. Zhang L., Ba J., Carcione J.M. Wave propagation in infinitupleporosity media // J. Geophy Res: Solid Earth. 2021. V. 126. № 4. DOI: 10.1029/2020JB021266
20. Ситникова Л.Ф., Гималтдинов И.К. Задача о распространении акустических волн в пористой среде, насыщенной пузырьковой жидкостью // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2021. Т. 13. № 1. С. 59—66. DOI: 10.14529/mmp210107. EDN QVHMWD.
21. Li J.X., Rezaee R., Muller T.M. Wettability effect on wave propagation in saturated porous medium // J. Acoust. Soc. Am. 2020. V. 147. P. 911—920. DOI: 10.1121/10.0000616
22. Venegas R., Zielinski T. G., Nunez G., Becot F.-X. Acoustics of porous composites // Composites Part B Engineering. 2021. V. 220. 109006 p. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109006
23. Tao L. Porosity reconstruction based on Biot elastic model of porous media by homotopy perturbation method // Chaos, Solitons & Fractals. 2022. V. 158. 112007 p. DOI: 10.1016/j.chaos.2022.112007
24. Goyal S., Bhagwan J., Tomar S.K. Elastic waves at the plane interface of swelling porous half-space and viscoelastic half-space with voids // Int. J. Mech. Sci. 2020. V. 188. 105942 p. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105942
25. Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю., Дудко Д.Н. Взаимодействие акустических волн с пористым слоем // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16. № 3. С. 455—470. EDN KTOLRN.
26. Голуб М.В., Дорошенко О.В., Оконешникова Е.А., Фоменко С.И. Моделирование распространения упругих волн в слоистом периодическом композите с дважды периодическим массивом интерфейсных отслоений произвольной формы // Математическое моделирование в естественных науках. 2022. Т. 1. С. 71—74. EDN KYBHPB.
27. Исаев О.Ю., Смирнов Д.В., Лепихин В.П., Белова М.Ю., Колесова С.М. Технология и аппаратурное оформление процесса производства уплотнительных материалов из терморасширенного графита // Конструкции из композиционных материалов. 2006. № 4. С. 76—79. EDN JZGEQJ.
28. Котов С.А., Музафарова С.-В.Р., Ливинцова М.Г. Исследование процессов уплотнения порошков терморасширенного графита при прокатке // Заготовительные производства в машиностроении. 2019. Т. 17. № 8. С. 366—370. EDN XHGSSI.
29. Богдан О.П., Муравьева О.В., Блинова А.В., Злобин Д.В. Исследование плотности образцов из терморасширенного графита акустическим амплитудно-теневым методом // Дефектоскопия. 2023. № 8. С. 21—31. DOI: 10.31857/S0130308223080031. EDN DYTIAAG.
30. Секоян С.С., Шлегель В.Р., Бацанов С.С., Гаврилкин С.М., Поярков К.Б., Гурков А.А., Дуров А.А. Влияние пористости и дисперсности материалов на скорость распространения звуковых волн // Прикладная механика и техническая физика. 2009. Т. 50. № 4 (296). С. 121—127. EDN: KVDCIF
31. Кравцов А.В., Шорникова О.Н., Булыгина А.И., Соловьев А.Б., Кустов А.Л., Авдеев В.В. Исследование пористой структуры терморасширенного графита, полученного из нитрата высококоориентированного пиролитического графита // Журнал физической химии. 2023. Т. 97. № 6. С. 827—835. DOI: 10.31857/S0044453723060122. EDN: LJQQW.
32. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. 2-е изд. дополненное и переработанное. М.: Наука, 1973. 340 с.
33. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. Пер. с нем. / Под ред. В. С. Григорьева и Л. Д. Розенберга. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. 726 с.

34. Kuznetsov S.V., Mondrus V.L. Love waves in stratified monoclinic media // Quarterly of Applied Mathematics. 2004. V. 62. No. 4. P. 749—766. DOI: 10.1090/qam/2104272. EDN LIVDIN.
35. Kuznetsov S.V. Guided waves in stratified media with equal acoustic impedances // Mechanics of Materials. 2022. V. 170. P. 104338. DOI: 10.1016/j.mechmat.2022.104338. EDN MCHXLS.

REFERENCES

1. Biot M.A. Acoustics, elasiticity, and thermodynamics of porous media: twenty-one papers. New York: Acoustical Society of America, 1992. 265 p.
2. Gubaidullin A.A., Boldyreva O.Yu., Dudko D.N. Velocity and attenuation of linear waves in porous media saturated with gas and its hydrate // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2022. V. 63. No. 4 (374). P. 56—63. DOI: 10.1134/s002189442204006x. EDN PQARJW.
3. Yang Q., Malcolm A., Rusmanugroho H., Mao W. Analysis of radiation patterns for optimized full waveform inversion in fluid-saturated porous media // Geophysical Journal International. 2019. V. 216. № 3. P. 1919—1937. DOI: 10.1093/gji/ggy525
4. Sivanantham M., Thyla P., Loganathan P., Sathish S. Measuring Methods of Acoustic Properties and Influence of Physical Parameters on Natural Fibers: A Review // Journal of Natural Fibers. 2019. V. 17. № 12. P. 1—20. DOI: 10.1080/15440478.2019.1598913
5. Zhao H., Wang Y., Yu D., Yang H., Zhong J., Wu F., Wen J. A double porosity material for low frequency sound absorption // Composite Structures. 2020. V. 239. 111978 p. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111978
6. Oh J.-H., Kim J.-S., Nguyen V.-H., Oh I.-K. Auxetic graphene oxide-porous foam for acoustic wave and shock energy dissipation // Composites Part B: Engineering. 2020. V. 186. 107817 p. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107817
7. Gubaidullin D.A., Fedorov Y.V. Peculiarities of Acoustic Wave Reflection from a Boundary or Layer of a Two-Phase Medium // Acoustical Physics. 2018. V. 64. No. 2. P. 164—174. DOI: 10.1134/S1063771018020057. EDN XXNDJB.
8. Dmitriev V.L., Ponomareva E.A. Rasprostranenie akusticheskikh voln v sloistykh poristykh sredakh / Trudy Instituta mekhaniki UNTs RAN. Ufa: Gilem, 2007. P. 169—175.
9. Jimenez N., Umnova O., Groby J.-P. Acoustic Waves in Periodic Structures, Metamaterials, and Porous Media: From Fundamentals to Industrial Applications. Topics in Applied Physics. Springer, 2021. 444 p.
10. Bogdan O.P., Zlobin D.V., Murav'eva O.V., Molin S.M., Platunov A.V. Evaluation of nonuniformity of elastic properties of sheets made from closed-cell polyolefin foams by acoustic method // Devices and Methods of Measurements. 2021. T. 12. № 1. C. 58—66. DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-1-58-66. EDN AKZRSR.
11. Bogdan O.P., Murav'eva O.V., Platunov A.V., Risev D.S. Investigation of the characteristics of sheets of polyurethane foam by acoustic methods // Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. 2020. V. 23. No. 2. P. 61—68.
12. Fedotovskii V.C. A Porous Medium As an Acoustic Metamaterial with Negative Inertial and Elastic Properties // Acoustical Physics. 2018. V. 64. No. 5. P. 548—554. DOI: 10.1134/S1063771018050020. EDN WTURTZ.
13. Horoshenkov K., Hurrell A., Groby J.-P. Erratum: A three-parameter analytical model for the acoustical properties of porous media // J. Acoust. Soc. Am. 2019. V. 145 (4). P. 2512—2517. DOI: 10.1121/10.0000560
14. Zhang W., Mehrabian A. Связь поромеханики и адсорбции в мультипористых твердых телах // Физ. мезомех. 2023. Т. 26. № 2. С. 43—56. DOI: 10.55652/1683-805X_2023_26_2_43. EDN LYEEKU.
15. Fomenko S.I., Dzhana R.B., Romashin A.K. Modelirovanie rasprostraneniya uprugikh voln v dvukhfaznoi poristo-uprugoi srede i opredelenie effektivnykh modulei s pomoshch'yu poverkhnostnykh voln / Matematicheskoe modelirovanie v estestvennykh naukakh. Materialy XXXI Vserossiiskoi shkoly-konferentsii. Perm', 05–08 oktyabrya 2022. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2022. V. 1. P. 308—310. EDN LYMNAZ.
16. Kidner M., Hansen C. A comparison and review of theories of the acoustics of porous materials // International Journal of Acoustics and Vibrations. 2008. V. 13. P. 1—27.
17. Lenkov S.V. Acoustic surface waves in porous-elastic biphasic media // Chemical physics and mesoscopy. 2023. V. 25. No. 3. P. 375—384. DOI: 10.15350/17270529.2023.3.33. EDN PBCENE.
18. Il'yasov K.K., Kuznetsov S.V., Sekerzh-Zen'kovich S.Y., Kravtsov A.V. Features of acoustic waves in media with large porosity values in the framework of the Biot theory // Acoustical Physics. 2017. V. 63. No. 6. P. 711—715. DOI: 10.1134/S1063771017060045. EDN XNNLKD.
19. Zhang L., Ba J., Carcione J.M. Wave propagation in infinitupleporosity media // J. Geophy Res: Solid Earth. 2021. V. 126. № 4. DOI: 10.1029/2020JB021266
20. Sitdikova L.F., Gimaltdinov I.K. The problem of the propagation of acoustic waves in a porous environment saturated with bubble liquid // Bulletin of the south ural state university. Series: mathematics. Mechanics. Physics. 2021. V. 13. No. 1. P. 59—66. DOI: 10.14529/mmp210107. EDN QVHMWD.
21. Li J.X., Rezaee R., Muller T.M. Wettability effect on wave propagation in saturated porous medium // J. Acoust. Soc. Am. 2020. V. 147. P. 911—920. DOI: 10.1121/10.0000616

22. *Venegas R., Zielinski T. G., Nunez G., Becot F.-X.* Acoustics of porous composites // Composites Part B Engineering. 2021. V. 220. 109006 p. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109006
23. *Tao L.* Porosity reconstruction based on Biot elastic model of porous media by homotopy perturbation method // Chaos, Solitons & Fractals. 2022. V. 158. 112007 p. DOI: 10.1016/j.chaos.2022.112007
24. *Goyal S., Bhagwan J., Tomar S.K.* Elastic waves at the plane interface of swelling porous half-space and viscoelastic half-space with voids // Int. J. Mech. Sci. 2020. V. 188. 105942 p. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105942
25. *Gubaidullin A.A., Boldyreva O.Y., Dudko D.N.* Interaction of acoustic waves with porous layer // Thermophysics and Aeromechanics. 2009. V. 16. No. 3. P. 429—443. DOI: 10.1134/S0869864309030123. EDN MWUHRV.
26. *Golub M.V., Doroshenko O.V., Okoneshnikova E.A., Fomenko S.I.* Modelirovaniye rasprostraneniya uprugikh voln v sloistom periodicheskem kompozite s dvazhdy periodicheskim massivom interfeisnykh otsloenii proizvol'noi formy // Matematicheskoe modelirovaniye v estestvennykh naukakh. 2022. V. 1. P. 71—74. EDN KYBHPB.
27. *Isaev O.Yu., Smirnov D.V., Lepikhin V.P., Belova M.Yu., Kolesova S.M.* Technology and the hardware solution of a process of manufacture of thickening materials from thermal expanded graphite // Composite materials constructions. 2006. No. 4. P. 76—79. EDN JZGEQJ.
28. *Kotov S.A., Muzafarova S.-V.R., Livintsova M.G.* Study of compaction processes of thermally expanded graphite powders during rolling // Blanking production in mechanical engineering. 2019. V. 17. No. 8. P. 366—370. EDN XHGSSI.
29. *Bogdan O.P., Murav'eva O.V., Blinova A.V., Zlobin D.V.* Investigation of Density of Samples Made of Thermally Expanded Graphite by Acoustic Amplitude-Shadow Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2023. V. 59. No. 8. P. 857—867. DOI: 10.1134/s106183092370050x. EDN JYGZTH.
30. *Sekoyan S.S., Shlegel' V.R., Batsanov S.S.* Effect of the porosity and particle size of materials on sound-wave velocity // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2009. V. 50. No. 4. P. 646—650. DOI: 10.1007/s10808-009-0086-y. EDN LLTOMR.
31. *Krautsou A., Shornikova O.N., Avdeev V.V.* Using a Neural Network to Study the Effect of the Means of Synthesizing Exfoliated Graphite on Its Macropore Structure // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2023. V. 97. No. 6. P. 1168—1173. DOI: 10.1134/s0036024423060110. EDN VCTGRE.
32. *Brekhovskikh L.M.* Volny v sloistykh sredakh. 2-e izd. dopolnennoe i pererabotannoe. M.: Nauka, 1973. P. 340.
33. *Bergman L.* Ul'trazvuk i ego primenenie v naуke i tekhnike. Per. s nem. / Pod red. V. S. Grigor'eva i L. D. Rozenberga. Moskva: Izd-vo inostr. lit., 1956. P. 726.
34. *Kuznetsov S.V., Mondrus V.L.* Love waves in stratified monoclinic media // Quarterly of Applied Mathematics. 2004. V. 62. No. 4. P. 749—766. DOI: 10.1090/qam/2104272. EDN LIVDIN.
35. *Kuznetsov S.V.* Guided waves in stratified media with equal acoustic impedances // Mechanics of Materials. 2022. V. 170. P. 104338. DOI: 10.1016/j.mechmat.2022.104338. EDN MCHXLS.

УДК 620.179.15

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЕФЕКТОВ ПРИ КОМПЬЮТЕРНОЙ РАСШИФРОВКЕ ЦИФРОВЫХ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2024 г. С.А. Григорченко^{1,*}, В.И. Капустин^{2,**}

¹Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета,
Россия 140402 Московская область, г. Коломна, ул. Октябрьской революции, 408

²АО «НИЦ «ТЕХНОПРОГРЕСС», Россия 115432 Москва,
Проектируемый проезд № 4062, б, стр. 16
E-mail: *rent_sig@mail.ru; **kapustin@tpcorp.ru

Поступила в редакцию 03.09.2024; после доработки 15.10.2024

Принята к публикации 18.10.2024

Повышению эффективности идентификации изображений дефектов при компьютерной расшифровке радиографических изображений посвящена эта статья. В работе рассматривается задача сегментации изображений дефектов, а также модели сегментации изображений дефектов на радиографическом снимке как при ручной, так и компьютерной расшифровке. Показано отличие алгоритмов поиска и идентификации групп, скоплений, цепочек пор, шлаковых и металлических включений от ручной расшифровки снимков.

Разработаны и экспериментально проверены на АПК КАРС алгоритмы поиска и идентификации дефектов для применения в комплексах цифровой радиографии. Сходимость результатов компьютерной и ручной расшифровки составила 0,85.

Ключевые слова: объект контроля, радиографическое изображение, компьютерная расшифровка, дефект, изображение дефекта, группа, скопление, сегментация.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF DEFECT IMAGE IDENTIFICATION DURING COMPUTER DECODING OF DIGITAL RADIOGRAPHIC IMAGES OF WELDED JOINTS OF HAZARDOUS PRODUCTION FACILITIES

© 2024 S.A. Grigorchenko^{1,*}, V.I. Kapustin^{2,**}

¹Kolomna Institute (branch) Moscow Polytechnic University,
Russia 140402 Moscow region, Kolomna, Oktyabrskaya revolyutsii str., 408

²JSC SIC TECHNOPROGRESS, Russia 109548 Moscow,
Projected passage No. 4062, 6, building 16
E-mail: *rent_sig@mail.ru; **kapustin@tpcorp.ru

This article is devoted to improving the efficiency of flaw image identification during computer decoding of digital radiographic images. The paper studies the problem of segmentation of flaw images. Models of segmentation of flaw images on a radiographic image are studied for both manual and computer decoding. The difference between algorithms for searching and identifying groups, clusters, chains of pores, slag and metal inclusions from manual decoding of images is shown.

Algorithms for the search and identification of flaws for use in digital radiography complexes have been developed and experimentally tested at HSC KARS. The convergence of the results of computer and manual decryption was 0,85.

Keywords: monitored object, radiographic image, computer decoding, flaw, flaw image, group, cluster, segmentation.

DOI: 10.31857/S0130308224120056

ВВЕДЕНИЕ

Радиографический метод является одним из основных методов неразрушающего контроля сварных соединений, литья, литых лопаток и других объектов контроля (ОК) различных технических устройств на опасных производственных объектах [1, 2]. В настоящее время в Российской Федерации и за рубежом продолжает развиваться цифровая радиография. Разработаны зарубежные и отечественные цифровые комплексы, в состав которых входит соответствующее программное обеспечение (ПО): ПО для цифровой и компьютерной радиографии «Х-Vizor» [3], система улучшения и архивирования изображений «СОВА+» [4], ПО Дисофт [5] и др., которые на данный момент не обладают полной функциональностью, необходимой для автоматизации процесса расшифровки радиационных изображений, а также не всегда учитыва-

ют специфику контроля технических устройств на опасных производственных объектах [1, 2]. Поэтому в настоящей статье рассматривается контроль сварных соединений технических устройств на опасных производственных объектах с учетом требований НТД.

Компьютерная расшифровка цифровых радиографических изображений металлических сварных соединений (далее объектов контроля) в целях неразрушающего контроля может быть разделена на несколько операций: формирование, визуализация и архивация изображений; их сегментация и др. Вопросам формирования, визуализации и оценки качества цифровых радиационных изображений посвящено большое количество работ, например, [6—10]. Соответственно сегментация может быть разделена на два этапа. На первом этапе осуществляется обнаружение изображений дефектов (ИД) и их классификация. При этом используются различные методы распознавания образов (посредством нейронных сетей, вейвлет-анализа и др.) [11—19]. На втором этапе решается задача объединения обнаруженных ИД в группы изображений дефектов (ГИД) и/или скопления ИД (СИД). В дальнейшем для ГИД и СИД используется общий термин — объединение ИД (ОИД). После обнаружения ОИД необходимо определить их размеры и произвести оценку допустимости с учетом требований соответствующих нормативных документов (НД).

В качестве примера на рис. 1 представлена группа из четырех дефектов (1—4) [20, рис. 9.3]. Исходные данные: толщина ОК $S = 20$ мм. Категория II по НД НП-105-18 [21].

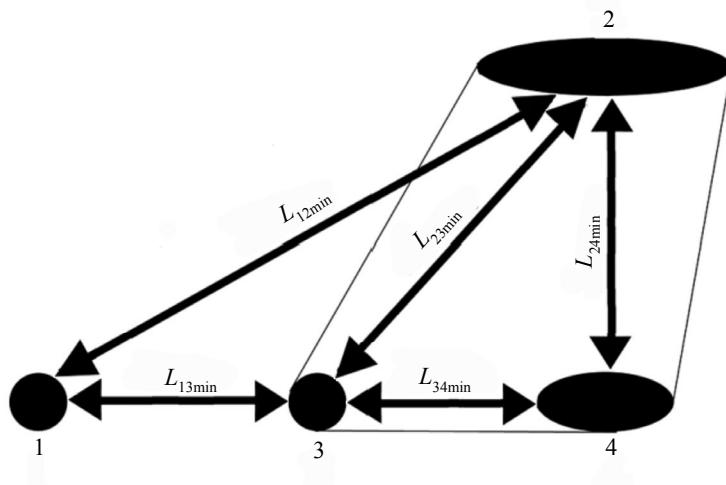


Рис. 1. Обобщенная схема определения расстояний между дефектами: $L_{12\min}$, $L_{13\min}$, $L_{23\min}$, $L_{24\min}$, $L_{34\min}$ — минимальные расстояния между дефектами.

Необходимо рассмотреть группу дефектов, классифицировать ее согласно НД НП-105-18 и определить допустимость дефектов по приведенному выше НД.

Для групповой классификации дефектов необходимо определить размеры дефектов и минимальные расстояния между дефектами 1—4, входящими в рассматриваемую группу дефектов, и установить их групповую принадлежность в соответствии с НД НП-105-18 [21].

Далее предполагается, что максимальные размеры дефектов, а также расстояния между ними указаны в мм. В случае компьютерной обработки линейные размеры определяются в пикселях, а затем пересчитываются в мм с учетом масштаба цифрового радиографического изображения. В свою очередь масштаб изображения в мм/пиксель вычисляется на основе разрешающей способности изображения и используемой схемы просвечивания или определяется по изображению объекта с известными геометрическими размерами, например, изображению канавочного эталона чувствительности контроля. Максимальные размеры дефектов указываются в формате $a \times b$, где a — максимальный размер дефекта или его длина; b — максимальный размер дефекта в направлении, перпендикулярном отрезку максимального размера, или максимальная ширина. Если $a = b$, то указывается диаметр дефекта, т.е. \varnothing .

Максимальные размеры дефектов: № 1 — $\varnothing 4,0$; № 2 — 15×3 ; № 3 — $\varnothing 4,0$; № 4 — 9×4 .

Минимальные расстояния между дефектами: $L_{12\min} = 40$; $L_{13\min} = 17$; $L_{23\min} = 24$; $L_{24\min} = 18$; $L_{34\min} = 11$.

Дефект № 1:

$L_{n12}^c = 3 \cdot \max[\max(b_1, b_2), \min(a_1, a_2)] = 3 \cdot \max[\max(4, 3), \min(4, 15)] = 3 \cdot 4 = 12$ — пороговое значение расстояния между дефектами № 1 и № 2 для скопления дефектов согласно НД НП-105-18;

$L_{n13}^c = 3 \cdot \max[\max(b_1, b_2), \min(a_1, a_2)] = 3 \cdot \max[\max(4, 4), \min(4, 4)] = 3 \cdot 4 = 12$ — пороговое значение расстояния между дефектами № 1 и № 3 для скопления дефектов.

Критерий включения дефектов в скопление по НД НП-105-18: $L_{ij\min} < L_{nij}^c$, где $L_{ij\min}$ — соответственно минимальное расстояние и пороговое расстояние для скопления между i -м и j -м дефектами. Тогда

$$\left. \begin{array}{l} L_{12\min} = 40 > L_{n12}^c = 12 \\ L_{13\min} = 17 > L_{n13}^c = 12 \end{array} \right\} \Rightarrow \text{дефект } \text{№ } 1 \text{ является одиночным.}$$

Дефекты № 2 и № 4:

$L_{n24}^r = \max(b_2, b_4) = \max(3, 4) = 4$ — пороговое значение расстояния между дефектами № 2 и № 4 для объединения в группу согласно НД НП-105-18;

$L_{n24}^c = 3 \cdot \max[\max(b_2, b_4), \min(a_2, a_4)] = 3 \cdot \max[\max(3, 4), \min(15, 9)] = 3 \cdot 9 = 27$ — пороговое значение расстояния между дефектами № 2 и № 4 для скопления дефектов.

Критерий включения дефектов в группу по НД НП-105-18: $L_{ij\min} < L_{nij}^r$, где $L_{ij\min}$ — соответственно минимальное расстояние и пороговое расстояние для объединения в группу между i -м и j -м дефектами. Тогда

$$\left. \begin{array}{l} L_{24\min} = 18 > L_{n24}^r = 4 \\ L_{24\min} = 18 < L_{n24}^c = 27 \end{array} \right\} \Rightarrow \text{дефекты } \text{№ } 2 \text{ и } \text{№ } 4 \text{ образуют скопление.}$$

Дефекты № 3 и № 4:

$L_{n34}^r = \max(b_3, b_4) = \max(4, 4) = 4$ — пороговое значение расстояния между дефектами № 3 и № 4 для объединения в группу;

$L_{n34}^c = 3 \cdot \max[\max(b_3, b_4), \min(a_3, a_4)] = 3 \cdot \max[\max(4, 4), \min(4, 9)] = 3 \cdot 4 = 12$ — пороговое значение расстояния между дефектами № 3 и № 4 для скопления дефектов.

$$\left. \begin{array}{l} L_{34\min} = 11 > L_{n34}^r = 4 \\ L_{34\min} = 11 < L_{n34}^c = 12 \end{array} \right\} \Rightarrow \text{дефекты } \text{№ } 3 \text{ и } \text{№ } 4 \text{ образуют скопление.}$$

Таким образом, дефект № 1 — одиночный, а дефекты № 2, № 3 и № 4 образуют скопление размером 25×24 .

Дефекты превышают допустимые размеры, так как по табл. 4.8 НД НП-105-18 допускается скопление с максимальным размером (длиной) 3,5 и одиночные крупные включения с максимальным размером и максимальной шириной $6 \times 2,5$.

В настоящее время расшифровка радиографических снимков ОК в основном выполняется вручную. Данная процедура расшифровки сложна и трудоемка. В случае компьютерной расшифровки ПО реализует ограниченный набор ручных операций: формирование изображений, отображение изображений на экране и их визуализация, измерение расстояния между пикселями, измерение яркости пикселя и др. Ручная компьютерная обработка обладает двумя существенными недостатками: высокая трудоемкость и субъективность. Оба недостатка в полной мере проявляются в процессе обнаружения и оценки как отдельных ИД, так и ОИД. В частности, в сложных с точки зрения количества, формы и взаимного расположения ИД случаях дефектоскопист должен выполнить с достаточной точностью необходимое количество измерений расстояния, на основании которых (измерений) принять решение о включении ИД в ОИД. Субъективность выполнения таких измерений может, с одной стороны, привести к перебраковке, с другой стороны, к недооценке совместного влияния близко расположенных дефектов на ОК. Оба варианта могут повлечь за собой существенные затраты на ремонт ОК.

В работе рассматривается программное решение задачи сегментации (поиска и оценивания) ОИД (групп, скоплений, цепочек) для применения в комплексах цифровой радиографии.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И АЛГОРИТМ ПОИСКА ОИД

В данной работе предполагается, что ИД обнаружены, т.е. изображение каждого дефекта характеризуется:

1) массивом пикселей P_{ki} , образующих контур ИД,

$$P_{ki} = \{p_{ki}[j] = (x_{ij}, y_{ij}), i = 0, 1, \dots, N_d; j = 0, 1, \dots, N_{ki} - 1\}, \quad (1)$$

где i — номер ИД; N_d — количество ИД; $p_{ki}[j]$ — j -й элемент массива P_{ki} ; x_{ij}, y_{ij}, N_{ki} — соответственно координаты j -го пикселя и количество пикселей, принадлежащих контуру i -го ИД. Контур ИД, в свою очередь, представляет собой замкнутую линию шириной в один пиксель, в которой отсутствуют петли. Элементы массива, описывающего контур ИД, упорядочены таким образом, что соседним элементам массива соответствуют расположенные рядом пиксели контура;

2) следующими параметрами: a_i — максимальный размер (наибольшее расстояние между двумя пикселями контура i -го ИД [21, 22]); b_i — максимальная ширина (наибольшее расстояние между двумя пикселями контура, измеренное в направлении, перпендикулярном отрезку максимального размера i -го ИД [21, 22]); a_{il} — максимальный размер i -го ИД вдоль шва [23]; a_{it} — максимальный размер i -го ИД поперек шва [23]; h_i — оценка максимального размера в направлении просвечивания (высоты) i -го дефекта [23];

3) тип и оценка допустимости дефекта.

Используя перечисленные выше данные, нужно определить контуры ОИД и вычислить параметры, необходимые соответственно для оценки их (ОИД) допустимости и качества ОК. При этом также предполагается, что процедура поиска ОИД является частью программного обеспечения информационной системы, в состав которой входит реляционная база данных (БД).

Известно ([21—23]), что объекты, относящиеся к изделиям разного типа, контролируются по различным методикам, которые изложены в соответствующих НД. Анализ НД показывает, что, с одной стороны, общим признаком для формирования ОИД является минимальное расстояние между ИД, которое на радиографическом изображении оценивается как минимальное расстояние между контурами ИД. С другой стороны, имеются некоторые отличия в критериях включения ИД в ОИД.

В табл. 1 приведены критерии формирования ОИД, соответствующие трем НД: НП-105-18 [21] определяет правила контроля объектов атомных энергетических установок; ГОСТ 23055—78 [22] используется при проведении радиографического контроля объектов газоснабжения и других объектов; СТО Газпром 2-2.4-917-2014 [23] содержит инструкцию по радиографическому контролю качества сварных соединений промысловых и магистральных трубопроводов.

Таблица 1

Нормативный документ	Критерий		Примечание
	Группа	Скопление, цепочка	
НП-105-18	$L_{ij\min} < L_{ij}^r$, $L_{ij}^r = \max(b_i, b_j)$, $N_{d\min} = 2$	$L_{ij}^r \leq L_{ij\min} < L_{ij}^c$, $L_{ij}^c = 3 \cdot \max[\max(bB_i, bB_j), \min(aA_i, aA_j)]$, $N_{d\min} = 2$	Группа или скопление мелких включений
ГОСТ 23055—78	$L_{ij\min} < L_{ij}^r$, $L_{ij}^r = \max(b_i, b_j)$, $N_{d\min} = 2$	$L_{ij}^r \leq L_{ij\min} < L_{ij}^c$, $L_{ij}^c = 3 \cdot \max(bB_i, bB_j)$, $N_{d\min} = 3$	Группа или скопление включений
СТО Газпром 2-2.4-917-2014		$L_{ij\min} < L_{ij}^c$, $L_{ij}^c = 3 \cdot \max(aA_i, aA_j)$, $N_{d\min} = 3$	Скопление или цепочка пор, скопление или цепочка шлаковых включений

В табл. 1 приняты следующие обозначения: $L_{ij\min}$ — минимальное расстояние между i -м и j -м изображениями дефектов: включений, групп включений, скоплений или цепочек включений; L_{ij}^r — пороговое значение $L_{ij\min}$ для группы включений; L_{ij}^c — пороговое значение $L_{ij\min}$ для скопления и цепочки включений; $N_{d\min}$ — минимальное количество включений в группе, скоплении или цепочке; b_k — максимальная ширина k -го изображения включения; aA_k — максимальный размер k -го изображения включения (группы включений) a_k или скопления (цепочки) включений A_k ; bB_k — максимальная ширина изображения k -го включения (группы включений) b_k или скопления (цепочки) включений B_k .

Следует отметить, что НД НП-105-18 определяет два вида объединений дефектов: группу включений и скопление включений, где под включениями понимаются дефекты типа пора, шлаковое или вольфрамовое включение. При этом группу образуют два и более включений, минимальное расстояние между которыми меньше $L_{nij}^r = \max(b_i, b_j)$ (см. табл. 1). Скопление образуют также два и более мелких (допустимых) включений, минимальное расстояние между которыми меньше $L_{nij}^c = 3 \cdot \max[\max(bB_i, bB_j), \min(aA_i, aA_j)]$.

ГОСТ 23055—78 аналогично НП-105-18 определяет группу включений. В свою очередь, скопление образуют три и более любых включений, минимальное расстояние между которыми меньше $L_{nij}^c = 3 \cdot \max(bB_i, bB_j)$, т.е. критерий для скопления отличается от критерия, изложенного в НП-105-18.

СТО Газпром 2-2.4-917-2014 в части оценки качества сварных соединений строящихся трубопроводов определяет: скопления пор или шлаковых включений; цепочки пор или шлаковых включений. Такие объединения дефектов образуют не менее трех однотипных дефектов (пор или шлаковых включений), минимальное расстояние между которыми меньше $L_{nij}^c = 3 \cdot \max(aA_i, aA_j)$. В свою очередь, цепочки дефектов отличаются от скоплений дефектов тем, что дефекты в цепочке располагаются вдоль прямой.

Таким образом, анализ НД показывает, что объединения дефектов определяются по-разному в НП-105-18, ГОСТ 23055—78 и СТО Газпром 2-2.4-917-2014. Следовательно, универсальный алгоритм поиска ОИД должен обеспечивать вычисление различных критериев формирования групп, скоплений и цепочек ИД, а выбор используемого критерия должен соответствовать НД, на основе которого осуществляется контроль объекта изделия определенного типа.

Для примера на рис. 2 схематично изображен один из возможных вариантов взаимного расположения двух ИД с размерами $aA_i = a_i$, $bB_i = b_i$ и $aA_j = a_j$, $bB_j = b_j$. Согласно НД НП-105-18 (см. табл. 1):

$$\begin{aligned} L_{nij}^c &= 3 \cdot \max[\max(bB_i, bB_j), \min(aA_i, aA_j)] = 3 \cdot \max[\max(b_i, b_j), \min(a_i, a_j)] = \\ &= 3 \cdot \max[b_i, a_j] = 3 \cdot a_j. \end{aligned}$$

На рис. 2 видно, что $L_{ij\min} < L_{nij}^c = 3 \cdot a_j$, т.е. рассматриваемые ИД должны объединяться в СИД.

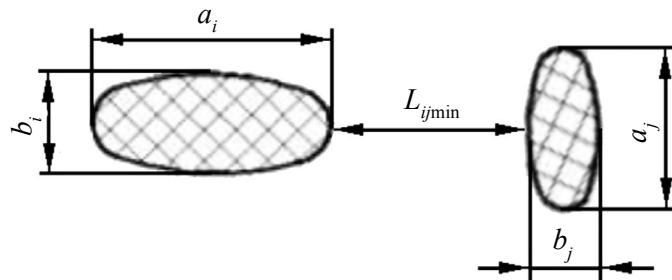


Рис. 2. Пример объединения двух включений в скопление по НД НП-105-18.

Краткое описание алгоритма поиска ОИД, упрощенная блок-схема которого изображена на рис. 3:

1. Выбор критерия поиска и чтение из БД параметров критерия поиска ОИД.
2. Чтение необходимых параметров ИД, включая контур ИД, из БД в массив.
3. Формирование ГИД, если это предусмотрено выбранным критерием. При этом организуется два вложенных цикла, в которых перебираются все пары ИД. Для каждой пары ИД вычисляются $L_{ij\min}$, L_{nij}^r (см. табл. 1). Если $L_{ij\min} < L_{nij}^r$, то создается или изменяется ранее созданная ГИД. ИД, образующие группу, помечаются как элементы ГИД и в дальнейшем не рассматриваются. После завершения циклов поиска для каждой ГИД определяется ее контур и параметры, необходимые для дальнейшей обработки (максимальный размер, максимальная ширина и др.); вычисляются координаты прямоугольника, в который вписывается контур ГИД. В свою очередь, обнаруженная ГИД рассматривается как новое отдельное ИД.

4. Формирование СИД. При этом организуется три вложенных цикла. Два внутренних цикла обеспечивают перебор всех пар следующих объектов: отдельных ИД, ГИД и ранее сформированных, начиная со второго прохода внешнего цикла, потенциальных СИД. Для каждой

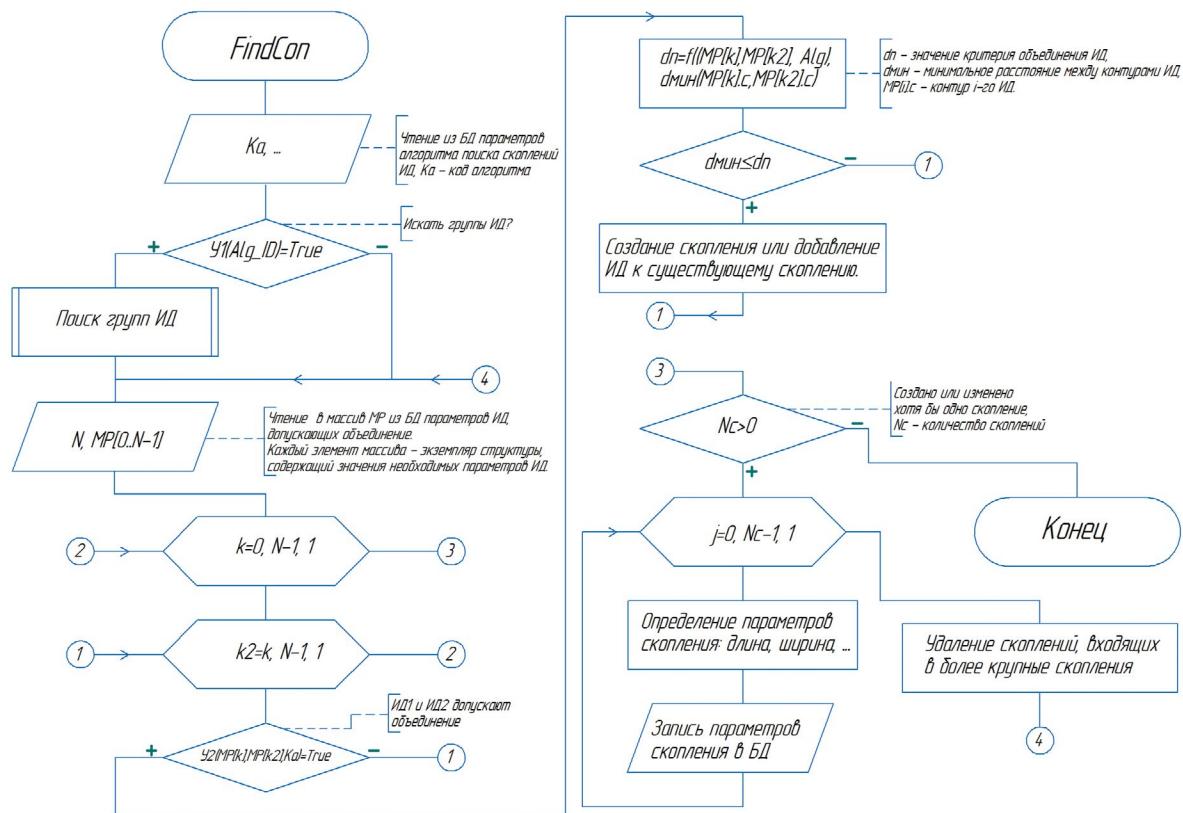


Рис. 3. Упрощенная блок-схема алгоритма поиска ОИД.

пары таких объектов вычисляются $L_{ij\min}, L_n^c$ (см. табл. 1). Если $L_{ij\min} < L_n^c$, то создается или изменяется ранее созданное потенциальное СИД. ИД, образующие потенциальное СИД, помечаются как элементы потенциального СИД и в дальнейшем не рассматриваются. Если в очередном проходе внешнего цикла не найдено ни одного потенциального СИД, то внешний цикл завершается. В противном случае определяется количество ИД в каждом потенциальном СИД N_d . Если для некоторого потенциального СИД $N_d < N_{d\min}$ (см. табл. 1), то с входящих в него ИД снимается соответствующая пометка, а в свою очередь это потенциальное СИД удаляется. Если все потенциальные скопления будут удалены, то внешний цикл завершается. В противном случае для каждого теперь уже обнаруженного СИД определяется его контур и параметры, необходимые для продолжения поиска более крупных СИД (максимальный размер, максимальная ширина), а это СИД рассматривается как новый отдельный дефект. В следующем проходе внешнего цикла (как отмечалось ранее) могут добавляться в уже сформированные СИД, отдельные ИД или ГИД, а также ранее обнаруженные СИД объединяться в новые более крупные СИД. В результате образуются СИД, которые являются изображениями одиночных скоплений дефектов, а также остаются одиночные ИД (изображения одиночных групп дефектов), не вошедшие в состав СИД.

5. После выполнения четвертого шага выполняется ряд дополнительных операций. Если критерий поиска предполагает деление СИД на скопления и цепочки, то вычисляется отношение максимального размера СИД к его максимальной ширине, по значению которого (по аналогии с разбиением одиночных дефектов на протяженные и компактные [19]) принимается решение о типе СИД (скопление или цепочка). Для каждого СИД: вычисляется сумма площадей, входящих в него ИД; определяется ИД с максимальной площадью и фиксируются основные параметры этого ИД; определяется дефект с максимальной высотой, которая принимается за высоту СИД; вычисляются координаты прямоугольника, в который вписывается контур СИД. Сформированные данные об отдельных ИД, ГИД и СИД используются: при автоматизированном определении качества ОК [24]; в процессе формирования заключения о качестве ОК; для их (ИД, ГИД и СИД) визуализации.

6. Запись в БД информации о найденных ОИД.

Параметры алгоритмов поиска ОИД удобно хранить в БД. Перед расшифровкой изображений в БД заносится информация об объектах контроля, начиная с типа изделия. Типы изделий

хранятся в предварительно сформированной справочной таблице. Выбирая тип изделия, дефектоскопист неявно выбирает алгоритм оценки качества объекта контроля, включая алгоритм поиска ОИД.

Данные, представленные в табл. 1, свидетельствует о том, что, во-первых, объединяться могут только ИД определенных типов, во-вторых, типы объединяемых дефектов зависят от критерия: любые мелкие включения, любые включения, только поры или только шлаковые включения. Информацию об объединяемых ИД в зависимости от критерия удобно хранить в БД. На основе этой информации перед циклом поиска ОИД формируется двумерный логический массив размерностью N на N , где N — количество типов классифицируемых дефектов, а в качестве индексов элементов массива используются идентификаторы (коды) типов дефектов. Элементы этого массива имеют истинные значения для пар потенциально объединяемых ИД, что, в свою очередь, обеспечивает универсальность и простоту операции проверки условия возможного объединения ИД.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Было разработано и протестировано ПО, реализующее рассмотренный алгоритм сегментации и оценивания ОИД. Рис. 4 является графической иллюстрацией реализации рассмотренного алгоритма сегментации ОИД: фрагменты на этом рисунке — это фрагменты обработанного цифрового радиографического изображения, полученного в результате применения разработанного ПО.

На рис. 4 a представлен фрагмент радиографического изображения сварного соединения с ИД, которые классифицированы как включения. На этом рисунке контуры ИД выделены желтым цветом, а зеленым цветом обозначены границы сварного соединения. На рис. 4 b приведен тот же фрагмент, но после выполнения операции поиска ГИД. На этом рисунке контуры ИД, образующие ГИД, выделены синим цветом, а отдельные ИД и прямоугольники, описанные вокруг ГИД, — желтым цветом. Длины больших и меньших сторон описанных прямоугольников являются соответственно максимальным размером и максимальной шириной ГИД. На рис. 4 c приведен тот же фрагмент, но после последовательного выполнения операций поиска ГИД, а затем СИД. На этом рисунке: контуры ИД, образующие СИД, выделены синим цветом; прямоугольники, описанные вокруг ГИД, включенных в СИД, — сине-желтым пунктиром; прямоугольники, описанные вокруг СИД, — желтым цветом. Длины больших и меньших сторон, описанных вокруг СИД прямоугольников являются соответственно максимальным размером и максимальной шириной СИД. В приведенном примере обнаруженные ГИД и СИД соответствуют определениям групп и скоплений включений, данным в НД НП-105-18 и ГОСТ 23055—78.

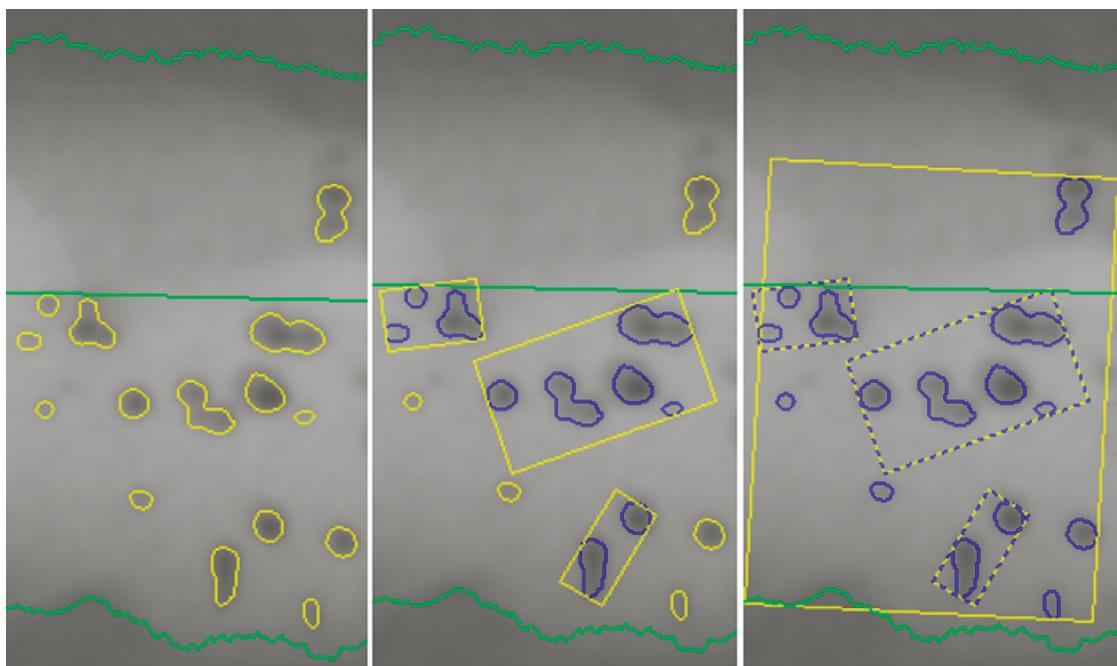


Рис. 4. Иллюстрация применения операции поиска СИД.

В процессе тестирования ПО оценивалось время выполнения операции поиска ОИД. Измерение времени производилось на ноутбуке с 64-разрядным четырехядерным процессором с тактовой частотой 2,4 ГГц и оперативной памятью объемом 8 ГБ. При обработке сложных изображений с количеством включений около ста время выполнения этой операции не превышало 5 с.

Разработанное ПО предоставляет дефектоскописту некоторые дополнительные возможности: поиск только ГИД, если это предусмотрено используемым критерием формирования ОИД; поиск СИД с предварительным поиском ГИД или без него; поиск СИД за один или несколько проходов (второй вариант предполагает возможность объединения СИД в более крупные СИД); включение в ОИД изображения только допустимых дефектов; поиск ОИД в выбранной пользователем прямоугольной области изображения участка ОК.

Проверка алгоритмов поиска и идентификации групп, скоплений, цепочек пор и шлаковых включений проводилась на 120 радиографических снимках с применением разработанного ПО, который входил в состав ПО аппаратно-программного комплекса (АПК) «КАРС». Сходимость результатов компьютерной и ручной расшифровки составляло 0,85. Основная причина расхождения заключалась в погрешности измерения геометрических размеров ИД, расстояний между ИД, пропуск малоконтрастных изображений типа отдельных пор с контрастом менее 0,02 Б и субъективный фактор дефектоскопистов.

Поиск ОИД является относительно независимой операцией и может дополнять соответствующее программное обеспечение компьютерной и цифровой радиографии.

Разработанное ПО входит в состав ПО АПК «КАРС» (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2009610394), предназначенного для расшифровки и архивации радиографических изображений сварных соединений стальных газопроводов, технических устройств на опасных производственных объектах, который эксплуатируется в ряде лабораторий неразрушающего контроля РФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны и экспериментально проверены на аппаратно-программном комплексе «КАРС» алгоритмы поиска и идентификации групп, скоплений, цепочек пор, шлаковых и металлических включений для применения в комплексах компьютерной и цифровой радиографии.

2. Алгоритмы поиска и идентификации групп, скоплений, цепочек пор, шлаковых и металлических включений отличаются от ручной расшифровки:

во-первых, объединяться могут только ИД определенных типов;

во-вторых, типы объединяемых дефектов зависят от критерия: любые мелкие включения, любые включения, только поры или только шлаковые включения.

в рассмотренном решении задачи объединения изображений дефектов реализована возможность проверки условия объединения изображений дефектов любых типов (не только включений) в различных сочетаниях, что в свою очередь обеспечивает универсальность предлагаемого подхода.

3. Разработанное ПО с применением алгоритмов поиска и идентификации групп, скоплений, цепочек пор, шлаковых и металлических включений может быть встроено в цифровые комплексы с последующей доработкой в части использования методов искусственного интеллекта для расшифровки радиографических изображений сварных соединений стальных газопроводов, технических устройств на опасных производственных объектах РФ.

Авторы статьи благодарят за оказанную помощь по оформлению и обсуждению материала статьи к.т.н., доцента, ректора АНО ДПО ИПК «ТЕХНОПРОГРЕСС» Шевченко Светлану Александровну.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: Федеральный закон № 116 — ФЗ от 21.07.97 г. Принят Государственной Думой 20 июня 1997 г. [сайт]. 1997. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/11232> (дата обращения: 08.10.2024).

2. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20 октября 2020 г. N 420 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности» (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс] / Информационно-правовой портал «Гарант.ру»: <https://base.garant.ru/75039846/#friends> (дата обращения: 08.10.2024).

3. X-Vizor — ПО для цифровой и компьютерной радиографии. Общество с ограниченной ответственностью «Ньюком-НДТ» [сайт]. 2024. URL: <https://newcom-ndt.ru/x-vizor> (дата обращения: 08.10.2024).

4. Система улучшения и архивирования изображений “СОВА+” / Ассоциация научно-технического сотрудничества «ТЕСТРОН» [сайт]. 2024. URL: <http://www.testron.ru/ru/view/38> (дата обращения: 08.10.2024).
5. ПО Дисофт // Общество с ограниченной ответственностью «Центр Цифра» [сайт]. 2024. URL: <https://digital-xray.ru/product/po-disoft/#desc> (дата обращения: 08.10.2024).
6. Грудский А.Я., Величко В.Я. Оцифровка радиографических снимков — это не очень просто // В мире НК. 2011. № 4 (54). С. 74—76.
7. Грудский А.Я., Величко В.Я., Деч А.В. Как гарантировать достоверность и качество цифрового архива рентгеновских снимков кольцевых сварных соединений магистрального трубопровода? // В мире НК. 2012. № 4 (58). С. 34—40.
8. Багаев К.А., Козловский С.С. Оцифровка рентгеновских пленок. Что следует учесть при разработке и внедрении российских стандартов // В мире НК. 2013. № 3 (61). С. 30—35.
9. Деч А.В. Требования к программным комплексам улучшения и архивирования рентгеновских изображений // В мире НК. 2003. № 3 (21). С. 66—68.
10. Косарина Е.И., Крупнина О.А., Демидов А.А., Михайлова Н.А. Цифровое оптическое изображение и его зависимость от радиационного изображения при неразрушающем контроле методом цифровой рентгенографии // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 37—42. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-37-42
11. Назаренко С.Ю., Удоd В.А. Применение искусственных нейронных сетей в радиационном неразрушающем контроле // Дефектоскопия. 2019. № 6. С. 53—64.
12. Воробейчиков С.Э., Фокин В.А., Удоd В.А., Темник А.К. Оценка эффективности двух алгоритмов сегментации цифрового радиационного изображения объекта контроля // Дефектоскопия. 2017. № 2. С. 60—67.
13. Liu T., Zheng P., Bao J., Chen H. A state-of-the-art survey of welding radiographic image analysis: Challenges, technologies and applications // Measurement. 2023. V. 214. P. 112821. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.112821
14. Block S. B., Da Silva R. D., Lazzaretti A. E., Minetto R. LoHi-WELD: A Novel Industrial Dataset for Weld Defect Detection and Classification, a Deep Learning Study, and Future Perspectives // IEEE Access. 2024. V. 12. P. 77442—77453. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3407019
15. Say D., Zidi S., Qaisar S.M., Krichen M. Automated Categorization of Multiclass Welding Defects Using the X-ray Image Augmentation and Convolutional Neural Network // Sensors. 2023. V. 23. P. 6422. <https://doi.org/10.3390/s23146422>
16. Zhao S., Long L., An D., Wang Y., Zhang H., Liang H., Jin S. Design and Realization of Nondestructive Testing Information Management System for Shell Electron Beam Welds // Software Engineering and Applications. 2022. V. 11. No. 5. P. 1005—1016. DOI: 10.12677/SEA.2022.115103. <https://doi.org/10.12677/sea.2022.115103>
17. Harrouche S., Nacereddine N., Goumeidane A.B. A Comparative Study of Different CNN Models using Transfer Learning for Weld Defect Classification in Radiographic Testing // Proc. of the 4th International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering (ICECCE). 30—31 December 2023, Dubai, UAE. DOI: 10.1109/ICECCE61019.2023.10442057
18. Григорченко С.А., Ефименко Л.А. Автоматизация компьютерной расшифровки радиационных изображений сварных соединений // Дефектоскопия. 2015. № 1. С. 21—27.
19. Григорченко С.А., Капустин В.И. Классификация дефектов при автоматизированном радиографическом контроле сварных соединений // Дефектоскопия. 2009. Т. 45. № 9. С. 73—87.
20. Капустин В.И., Зуев В.М., Иванов В.И., Дуб А.В. Радиографический контроль. Информационные аспекты. Москва: ООО Издательство «НАУЧТЕХЛИТИЗДАТ», 2010. 368 с.
21. НП-105-18. Правила контроля металла оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок при изготовлении и монтаже.
22. ГОСТ 23055—78. Контроль неразрушающий. Сварка металлов плавлением. Классификация сварных соединений по результатам радиографического контроля.
23. СТО Газпром 2-2.4-917-2014. Инструкция по радиографическому контролю качества сварных соединений при строительстве и ремонте промысловых и магистральных трубопроводов.
24. Григорченко С.А. Автоматизированная оценка качества сварных соединений по параметрам радиографических изображений дефектов // Контроль. Диагностика. 2009. № 10. С. 30—36.

REFERENCES

1. On Industrial Safety of Hazardous Production facilities : Federal Law No. 116 — FZ dated 07/21/97 : adopted by the State Duma on June 20, 1997 [website]. 1997. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/11232> (Accessed on 08.10.2024).
2. Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated October 20, 2020. No. 420 “On approval of Federal norms and rules in the field of industrial safety “Rules for industrial safety expertise” (with amendments and additions) [Electronic resource] // Information and legal portal “Garant.ru”. Available at: <https://base.garant.ru/75039846/#friends> (Accessed on 08.10.2024).

3. X-Vizor — SOFTWARE for digital and computer radiography / Limited Liability Company “Newcom-NDT” [website]. 2024. Available at: <https://newcom-ndt.ru/x-vizor> (Accessed on 08.10.2024).
4. The system of image improvement and archiving “SOVA+” / Association of Scientific and technical cooperation “TESTRON” [website]. 2024. Available at: <http://www.testron.ru/ru/view/38> (Accessed on 08.10.2024).
5. Disoft software // Limited Liability Company “Center Tsifra” [website]. 2024. Available at: <https://digital-xray.ru/product/po-disoft/#desc> (Accessed on 08.10.2024).
6. Grudsky A. Ya., Velichko V. Ya. Digitization of radiographic images is not very easy // In the world of NDT. 2011. No. 4 (54). P. 74—76.
7. Grudsky A. Ya., Velichko V. Ya., Dech A. V. How to guarantee the reliability and quality of the digital archive of X-ray images of annular welded joints of the main pipeline? // In the world of NDT. 2012. No. 4 (58). P. 34—40.
8. Bagaev K. A., Kozlovsky S. S. Digitization of X-ray films. What should be taken into account when developing and implementing Russian standards // In the world of NDT. 2013. No. 3 (61). P. 30—35.
9. Dech A. V. Requirements for software applications for improving and archiving X-ray images // In the world of NDT. 2003. No. 3 (21). P. 66—68.
10. Kosarinal E.I., Krupnina O.A., Demidov A.A., Mikhaylova N.A. Digital optical pattern and its dependence on the radiation image at non-destructive testing by method of digital radiography // Aviation Materials and Technologies. 2019. No. 1 (54). P. 37—42. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-37-42
11. Nazarenko S.Yu., Udod V.A. Application of artificial neural networks in radiation non-destructive testing // Defectoskopiya. 2019. No. 6. P. 53—64.
12. Vorobeychikov S.E., Fokin V.A., Udod V.A., Temnik A.K. Estimating the efficiency of two algorithms for segmentation of digital radiation images of test objects // Defectoskopiya. 2017. No. 2. P. 60—67.
13. Liu T., Zheng P., Bao J., Chen H. A state-of-the-art survey of welding radiographic image analysis: Challenges, technologies and applications // Measurement. 2023. V. 214. P. 112821. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.112821
14. Block S. B., Da Silva R. D., Lazzaretti A. E., Minetto R. LoHi-WELD: A Novel Industrial Dataset for Weld Defect Detection and Classification, a Deep Learning Study, and Future Perspectives // IEEE Access. 2024. V. 12. P. 77442—77453. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3407019
15. Say D., Zidi, S., Qaisar S.M., Krichen M. Automated Categorization of Multiclass Welding Defects Using the X-ray Image Augmentation and Convolutional Neural Network // Sensors. 2023. V. 23. P. 6422. <https://doi.org/10.3390/s23146422>
16. Zhao S., Long L., An D., Wang Y., Zhang H., Liang H., Jin S. Design and Realization of Nondestructive Testing Information Management System for Shell Electron Beam Welds // Software Engineering and Applications. 2022. V. 11. No. 5. P. 1005—1016. DOI: 10.12677/SEA.2022.115103. <https://doi.org/10.12677/sea.2022.115103>
17. Harrouche S., Nacereddine N., Goumeidane A.B. A Comparative Study of Different CNN Models using Transfer Learning for Weld Defect Classification in Radiographic Testing // Proc. of the 4th International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering (ICECCE) 30—31 December 2023, Dubai, UAE. DOI: 10.1109/ICECCE61019.2023.10442057
18. Grigorchenko S.A., Efimenko L.A. Automation of computer interpretation of radiation images of welded joints // Defectoskopiya. 2015. No. 1. P. 21—27.
19. Grigorchenko S.A., Kapustin V.I. Classification of flaws in automated radiographic inspection of welded joints // Defectoskopiya. 2009. V. 45. No. 9. P. 73—87.
20. Kapustin V.I., Zuev V.M., Ivanov V.I., Dub A.V. Radiographic inspection. Information aspects. Moscow: LLC Publishing House “NAUCHTEKHLITIZDAT”, 2010. 368 p.
21. NP-105-18. Rules for metal control of equipment and pipelines of nuclear power plants during manufacture and installation.
22. GOST 23055—78. Non-destructive testing. Fusion welding of metals. Welds classification by radiography testing results
23. STO Gazprom 2-2.4-917-2014. Instructions for radiographic quality control of welded joints during the construction and repair of field and main pipelines.
24. Grigorchenko S.A. Automated assessment of the quality of welded joints according to the parameters of radiographic images of flaws // Control. Diagnostics. 2009. No. 10. P. 30—36.

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

© 2024 г. К.Е. Мызнов^{1,*}, О.Н. Василенко^{1,**}, В.Н. Костин^{1,***}, В.С. Тронза², А.Н. Бондина², С.С. Кукушкин², Н.Ю. Трякина², А.С. Саломатин²

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Kovalevskaya, 18

²ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург», Россия 620075 Екатеринбург, ул. Клары Цеткин, 14
E-mail: *myznov@imp.uran.ru; **vasilenko@imp.uran.ru; ***kostin@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 05.11.2024; после доработки 06.11.2024

Принята к публикации 08.11.2024

Проведена серия измерений на двух участках трубопровода из стали 17Г1С с помощью двух измерительных приборов: магнитный мультитестер ММТ-3 и магнитный структуроскоп КРМ-Ц-К2М. Получены карты распределения коэрцитивной силы, остаточной магнитной индукции и максимальной магнитной индукции по трубам. рассчитан коэффициент нагруженности для разных поперечных сечений трубопровода. Построены графики зависимости усредненных по поперечному сечению магнитных характеристик от коэффициента нагруженности. Выявлено, что наиболее опасным для разрушения сечениям, в которых коэффициент нагруженности превысил критическое значение 1,2, соответствуют пониженные значения коэрцитивной силы и остаточной магнитной индукции, полученные при направлении измерения вдоль оси трубопровода. Показано, что измерение вдоль оси на верхней части трубопровода, т.е. на 12 ч, показывает аналогичную зависимость, как и для усредненных по сечению значений, а это означает, что в наземных переходах трубопровода может быть достаточным измерение только на 12 ч.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, труба, трубопровод, надземный переход, магнитный метод, неразрушающий контроль.

ASSESSMENT OF STRESS-STRAIN STATE OF PIPELINES BASED ON THE MEASUREMENTS OF MAGNETIC CHARACTERISTICS IN FIELD CONDITIONS

© 2024 К.Е. Мызнов^{1,*}, О.Н. Василенко^{1,**}, В.Н. Костин^{1,***}, В.С. Тронза², А.Н. Бондина², С.С. Кукушкин², Н.Ю. Трякина², А.С. Саломатин²

¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Russia 620108 Yekaterinburg, S. Kovalevskaya Street, 18

²LLC “Gazprom transgas Ekaterinburg”, Russia 620075 Yekaterinburg, Clara Zetkin Street, 14
E-mail: *myznov@imp.uran.ru; **vasilenko@imp.uran.ru; ***kostin@imp.uran.ru

A series of measurements on two pipeline sections made of 17G1S (17Г1С) steel using two measuring devices: magnetic multimeter MMT-3 and magnetic analyser of structure KRM-C-K2M (КРМ-Ц-К2М) has been carried out. Maps of coercive force, residual magnetic induction and maximum magnetic induction on the pipes were obtained. The coefficient of loading for different cross-sections of the pipeline was calculated. Dependence of magnetic characteristics averaged over the cross-section on the coefficient of loading is plotted. It is revealed that the most dangerous for destruction cross-sections, in which the coefficient of loading exceeded the critical value of 1,2, correspond to the reduced values of coercive force and residual magnetic induction, obtained in the direction of measurement along the pipeline axis. It is shown that measurement along the axis at the top of the pipeline shows a similar relationship as for the cross-sectional averaged values, which means that in pipeline aerial crossings, measurement only at the top of the pipeline may be sufficient.

Keywords: stress-strain state, pipe, pipeline, aerial crossing, magnetic method, nondestructive testing.

DOI: 10.31857/S0130308224120068

ВВЕДЕНИЕ

Магистральные трубопроводы в процессе работы испытывают нагрузки различного характера. К нагрузкам относятся: растягивающие, сжимающие, изгибающие, скручивающие, сдвиговые и их комбинации [1, 2]. Источниками таких нагрузок являются: сила тяжести, действующая на трубопровод, реакция опор, давление грунта, внутреннее давление содержимого, смещение опор, внешние нагрузки на участках перехода [3—5]. Каждая из этих нагрузок влияет на магнитные свойства объекта контроля. Чтобы применять магнитную методы неразрушающего контроля для определения напряженно-деформированного состояния (НДС), нужно однозначно определить влияние нагрузок и их комбинаций на магнитные свойства. Существующие работы можно разделить на две группы: полевые испытания на трубопроводах и лабораторные иссле-

дования с использованием стационарных установок. Первые дают представление о наличии связей НДС и магнитных свойств, но в них, в основном, используются измерительные приборы, позволяющие определить только один параметр, например, коэрцитиметры [6—8]. Во вторых используются стандартные методики и стационарное оборудование, но они неприменимы на реальных объектах типа трубопроводов [9]. Вследствие этого отсутствуют широко распространенные методики определения напряженно-деформированного состояния по величинам магнитных свойств.

В качестве информативных параметров выбираются различные магнитные свойства: коэрцитивная сила (наиболее часто используемый параметр), остаточная магнитная индукция, максимальная дифференциальная магнитная проницаемость и другие. Также могут использоваться комбинации измеряемых параметров или одни и те же параметры, но измеренные в различных направлениях [10]. Для одноосной нагрузки анизотропия коэрцитивной силы (т.е. разность коэрцитивных сил в двух взаимно перпендикулярных направлениях) показывает монотонную и близкую к линейной зависимость от напряжений [10], поэтому часто применяется на практике [11, 12]. Существует метод контроля сжимающих напряжений по значениям напряженности магнитного поля, соответствующим пикам дифференциальной или обратимой магнитной проницаемости [13, 14].

Наиболее перспективными в контексте контроля массивных объектов выглядят исследования, в которых используются приставные измерительные преобразователи, позволяющие измерять сразу несколько магнитных параметров или всю петлю магнитного гистерезиса [15—19].

В связи с вышесказанным понятно, что остается актуальным вопрос разработки методики магнитного контроля напряженно-деформированного состояния трубопроводов и приборов, их реализующих в полевых условиях. Целью работы являлось установление потенциальной возможности использования магнитных параметров для контроля НДС участков трубопроводов путем проведения полевых исследований с использованием магнитного структуроископа с приставным измерительным преобразователем.

ОБЪЕКТЫ КОНТРОЛЯ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ

Полевые исследования проводились на участках трубопровода двух труб (рис. 1 и 2), являющихся надземными переходами, с одинаковым номинальным диаметром и толщиной стенки (упрощенная схема этих труб с указанием номинальных размеров показана на рис. 3). Длины надземного перехода L для труб «А» и «Б» были равны 46,4 и 34,6 м соответственно. Материал трубопровода — конструкционная сталь 17Г1С [20].

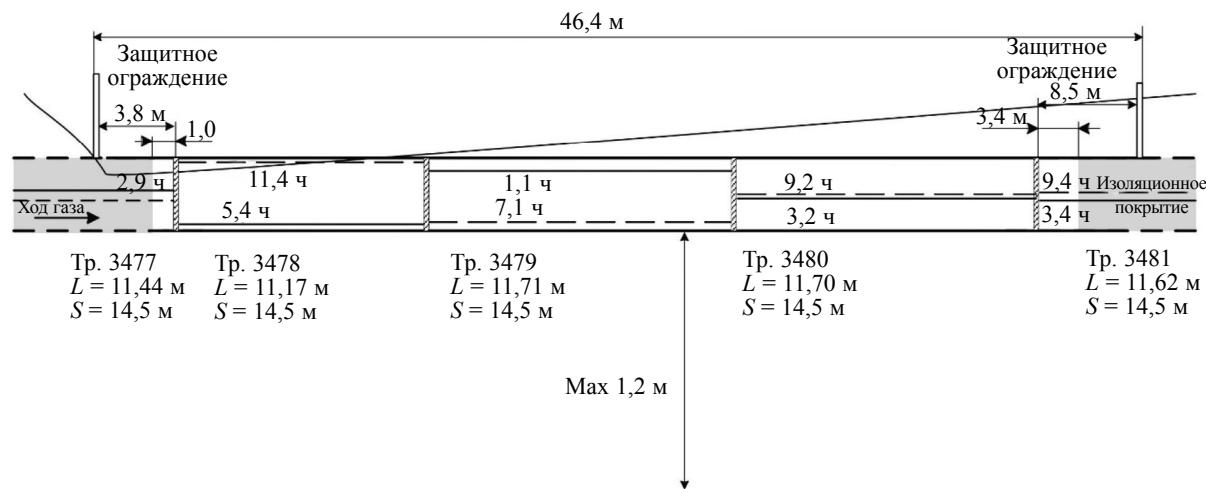


Рис. 1. Схема надземного перехода «А».

Измерения проводились с помощью магнитного мультитестера ММТ-3 [17] (рис. 4) и магнитного структуроископа КРМ-Ц-К2М [8] (рис. 5). Структуроископ КРМ-Ц-К2М измеряет коэрцитивную силу по току размагничивания H_c^{KRM} . ММТ-3 позволяет получать петлю магнитного гистерезиса и рассчитывать соответствующие магнитные характеристики: коэрцитивная сила по индукции H_c , остаточная магнитная индукция B_r , максимальная магнитная индукция B_m и другие. Контроль НДС только по коэрцитивной силе, определенной по току размагничивания,

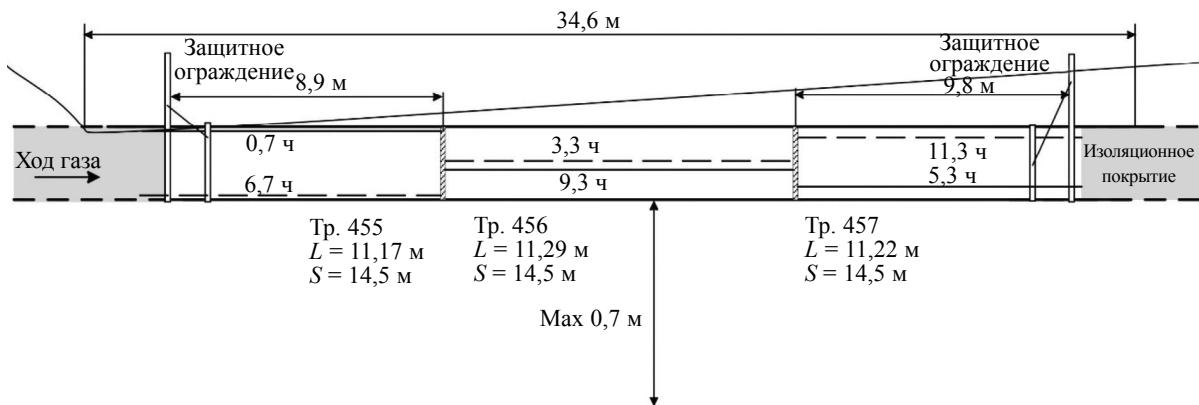


Рис. 2. Схема надземного перехода «Б».

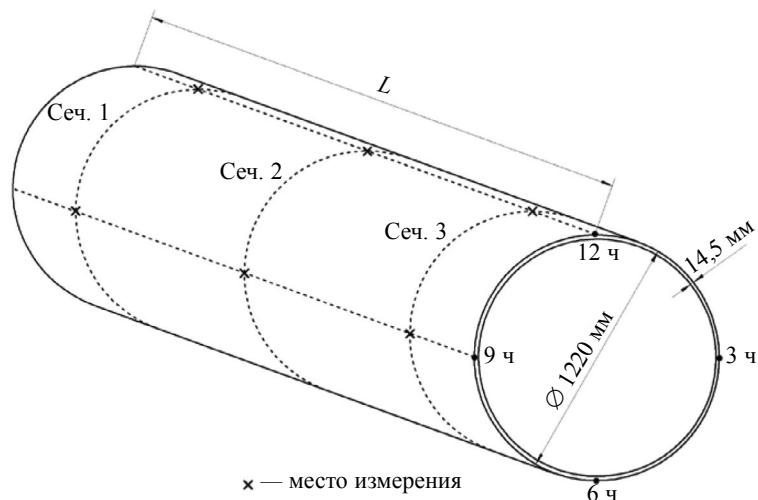


Рис. 3. Упрощенная схема трубы без указания сварных швов.



Рис. 4. Магнитный мультитестер ММТ-3.

приводит к неоднозначной оценке НДС низколегированных сталей [10], а также к влиянию на показания прибора формы и размеров изделия и других факторов [16, 21].

При измерении магнитных характеристик приставные преобразователи приборов (см. рис. 4, 5) помещались на внешнюю поверхность объекта контроля таким образом, чтобы перемагничивание и измерение происходило вдоль направления хода трубы (по оси) и по-перек хода трубы (по кольцу). Зоны контроля находились на пересечении трех поперечных сечений и четырех продольных сторон на 3, 6, 9 и 12 ч (см. рис. 3).



Рис. 5. Магнитный структуроскоп КРМ-Ц-К2М.

Методика и рекомендации по расчету напряженно-деформированного состояния в магистральном трубопроводе описаны в источниках [3—5]. Для определения уровня напряженно-деформированного состояния сечения обследуемого участка, согласно [3], используется коэффициент нагруженности K . Для определения коэффициента K необходимо найти коэффициенты нагруженности, соответствующие двум условиям: первому условию K_1 и второму условию K_2^+ , K_2^- . Из найденных для сечения значений K_1 , K_2^+ , K_2^- берется наибольшее.

Коэффициент нагруженности по первому условию K_1 вычисляется по одной из формул:

1) если осевые напряжения $\sigma_N \geq 0$:

$$K_1 = \frac{(\sigma_{\text{экв}})_N}{R_1}; \quad (1)$$

2) если осевые напряжения $\sigma_N < 0$:

$$K_1 = \frac{\sigma_{\text{экв},N}}{R_1}, \quad (2)$$

где R_1 — сопротивление растяжению (сжатию) по первому условию; $(\sigma_{\text{экв}})_N$ — эквивалентные напряжения по Мизесу, определяемые в соответствии с источником [3].

Оевые напряжения зависят от размеров, характеристик материала и условий эксплуатации трубы. Оевые напряжения определяются по формуле:

$$\sigma_N = -E\varepsilon_T + v\sigma_h, \quad (3)$$

где E — модуль Юнга; v — коэффициент Пуассона; ε_T — температурное расширение; σ_h — кольцевые напряжения.

Кольцевые напряжения определяются с помощью следующего выражения:

$$\sigma_h = \frac{p \cdot (D - 2t)}{2t}, \quad (4)$$

где p — внутреннее давление; D — внешний диаметр трубы; t — толщина стенки трубы.

Температурное расширение определяется с помощью следующей формулы:

$$\varepsilon_T = \alpha_T \Delta T, \quad (5)$$

где ΔT — максимальный перепад температур, определяемый согласно источнику [5]; α_T — коэффициент температурного расширения (линейного расширения).

Эквивалентные осевые напряжения $\sigma_{\text{экв},N}$ определяются так:

$$\sigma_{\text{экв},N} = \sqrt{(n\sigma_N)^2 - n\sigma_h\sigma_N + \sigma_N^2}, \quad (6)$$

где n — коэффициент надежности по внутреннему давлению (коэффициент перегрузки), который, согласно [3], принимается равным 1,1.

Значение R_1 определяется с помощью выражения:

$$R_1 = \frac{m}{k_1 k_n} R_1^n, \quad (7)$$

где R_1^n — нормативный предел прочности материала трубы; m — коэффициент условий работы участка газопровода; k_1 — коэффициент надежности по материалу трубы; k_n — коэффициент надежности по назначению трубопровода. Коэффициенты m , k_1 и k_n берутся согласно источнику [4].

Для точек на сечении трубы с растягивающими и сжимающими напряжениями используется две разные формулы для определения коэффициента нагруженности по второму условию:

1) для точки с растягивающими напряжениями ($\sigma_f \geq 0$):

$$K_2^+ = \frac{\sigma_f}{R_2}; \quad (8)$$

2) для точки со сжимающими напряжениями ($\sigma_f < 0$):

$$K_2^- = \frac{\sigma_{\text{экв},f}}{R_2}, \quad (9)$$

где σ_f — максимальные суммарные продольные напряжения (фибровые напряжения); $\sigma_{\text{экв},f}$ — эквивалентные фибровые напряжения; R_2 — сопротивление растяжению (сжатию) по второму условию.

При расчете фибровых напряжений учитываются не только размеры, характеристики материала и условия эксплуатации трубы, но и кривизна оси на разных координатах участка трубопровода. Ось трубопровода — условная линия, проходящая вдоль трубопровода через центр его поперечного сечения [22]. Фибровые напряжения определяются для двух крайних точек поперечного сечения трубы по формуле:

$$\sigma_f = E(\pm \varepsilon_b - \varepsilon_T) + v \sigma_h, \quad (10)$$

где ε_b — изгибная деформация.

Изгибная деформация определяется с помощью выражения:

$$\varepsilon_b = \frac{D}{2\kappa}, \quad (11)$$

где κ — результирующая кривизна оси на поперечном сечении трубы, которая определяется согласно [3].

Эквивалентные фибровые напряжения определяются с помощью следующего выражения:

$$\sigma_{\text{экв},f} = \sqrt{\sigma_h^2 - \sigma_h \sigma_f + \sigma_f^2}. \quad (12)$$

Значение R_2 определяется с помощью выражения:

$$R_2 = \frac{m}{k_2 k_n} R_2^n, \quad (13)$$

где R_2^n — нормативный предел текучести материала трубы; k_2 — коэффициент надежности по материалу трубы, который, согласно [3, 5], для наземных трубопроводов берется равным 0,9.

Если K превышает единицу, то это значит, что не выполняются первое и/или второе условие, т.е. на этом участке присутствуют значительные механические напряжения (табл. 1).

Таблица 1

Принимаемые решения в зависимости от уровня нагруженности участка газопровода

K	Решение
$K \leq 1$	Разрешается эксплуатация газопровода при рабочем (проектном) давлении
$1 < K \leq 1,2$	Корректировка положения оси участка газопровода в соответствии с плановым ремонтом До планового ремонта требуется периодическое техническое обслуживание участка
$K > 1,2$	Выход из эксплуатации с последующим ремонтом

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет коэффициента нагруженности показал, что в надземном переходе «А» нет сечений с превышением порога $K = 1$, значит труба полностью пригодна для эксплуатации, а часть надземного перехода «Б» превышает пороговые значения $K = 1,2$, следовательно, требуется вывод из эксплуатации этой трубы.

По полученным результатам измерений магнитных характеристик на трубах «А» и «Б» были построены цветовые карты распределения характеристик по поверхности трубы (рис. 6—9), в которых крестиками обозначены точки измерений, а цвета получены за счет интерполяции измерений между этими точками.

На рис. 6—8 представлены карты распределения максимальной магнитной индукции B_m , коэрцитивной силы H_c и остаточной магнитной индукции B_r , полученные с помощью ММТ-3 при измерении по оси (a, b) и по кольцу (δ, ε) трубопровода.

По рис. 6 видно, что значения B_m , измеренные по кольцу, ниже, чем B_m , полученные по оси. Определено, что значения B_m по оси находятся в диапазоне от 172 до 178 отн. ед., а по кольцу — от 155 до 170.

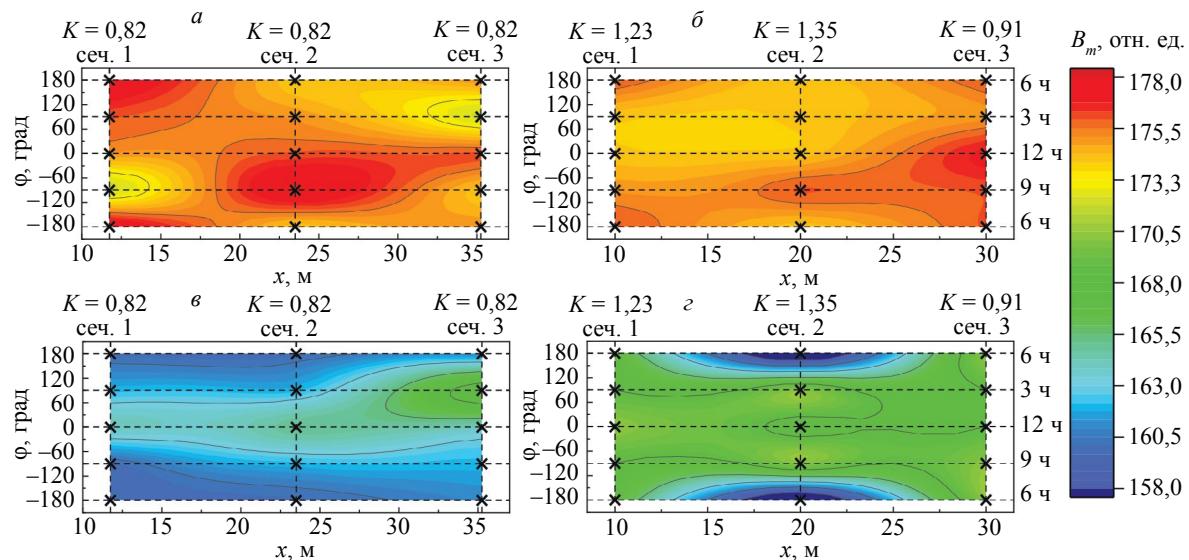


Рис. 6. Распределение (топограммы) максимальной магнитной индукции по трубам «А» (a, δ) и «Б» (b, ε), измеренной по оси (a, b) и кольцу (δ, ε) с помощью ММТ-3.

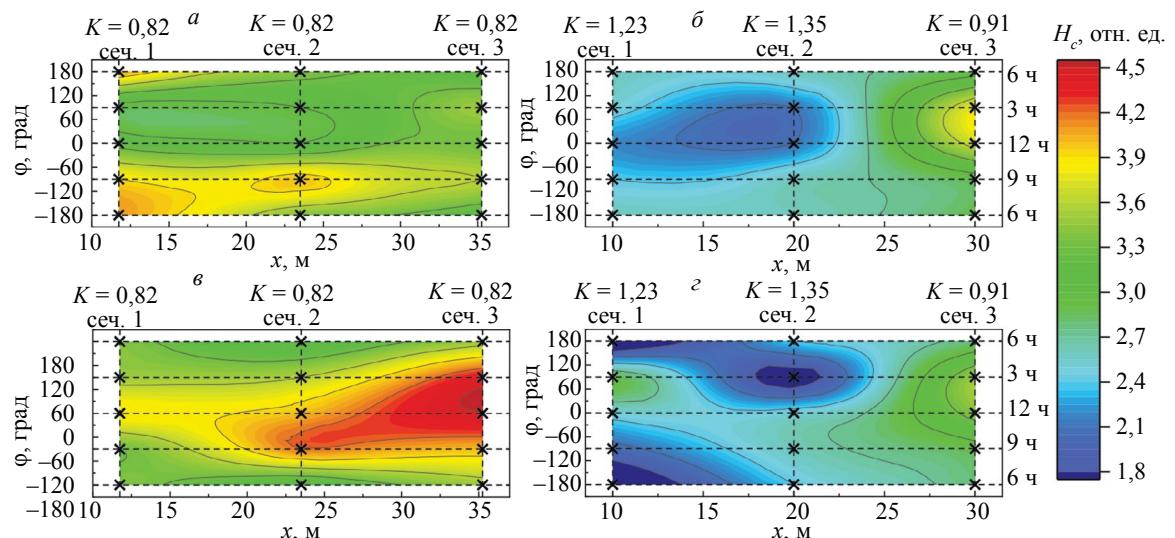


Рис. 7. Распределение (топограммы) коэрцитивной силы по трубам «А» (a, δ) и «Б» (b, ε), измеренной по оси (a, b) и кольцу (δ, ε) с помощью ММТ-3.

На рис. 7 видна тенденция к уменьшению H_c при увеличении K как по оси, так и по кольцу. Наиболее заметна такая тенденция на 3 и 12 ч при измерении по оси и на 3 ч при измерении по кольцу.

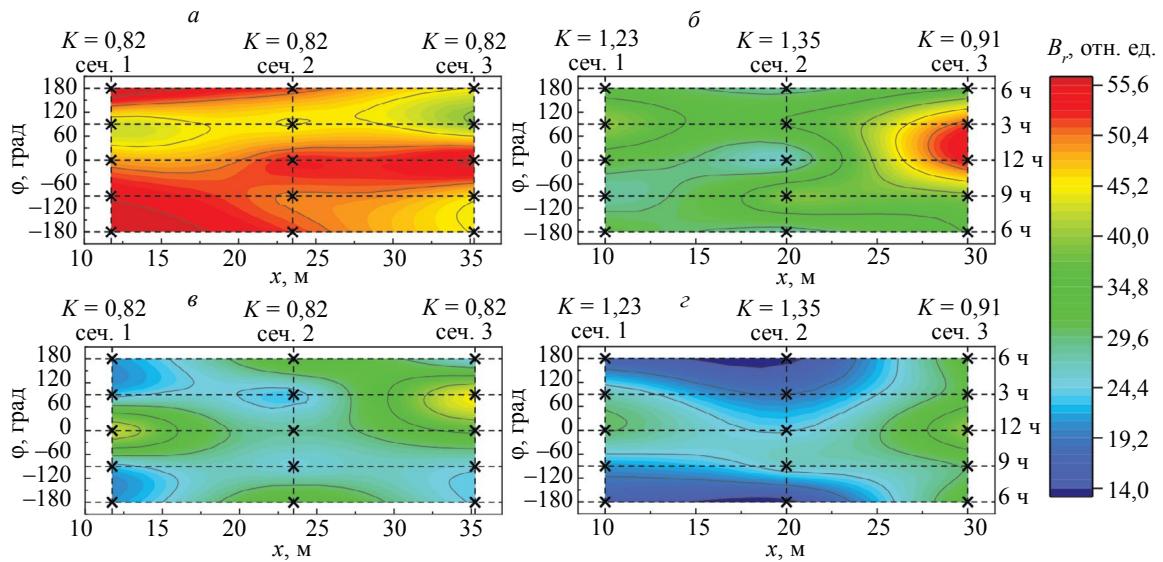


Рис. 8. Распределение (топограммы) остаточной магнитной индукции по трубам «А» (*а, в*) и «Б» (*б, з*), измеренной по оси (*а, б*) и кольцу (*в, з*) с помощью ММТ-3.

Также и на рис. 8 видна тенденция к уменьшению B_r при увеличении K . Наиболее заметна такая тенденция на 12 ч при измерении по оси и на 6 ч при измерении по кольцу.

На рис. 9 представлены карты распределения коэрцитивной силы H_c^{KPM} , полученные с помощью КМТ-3 при измерении по оси (*а, б*) и по кольцу (*в, з*) трубопровода.

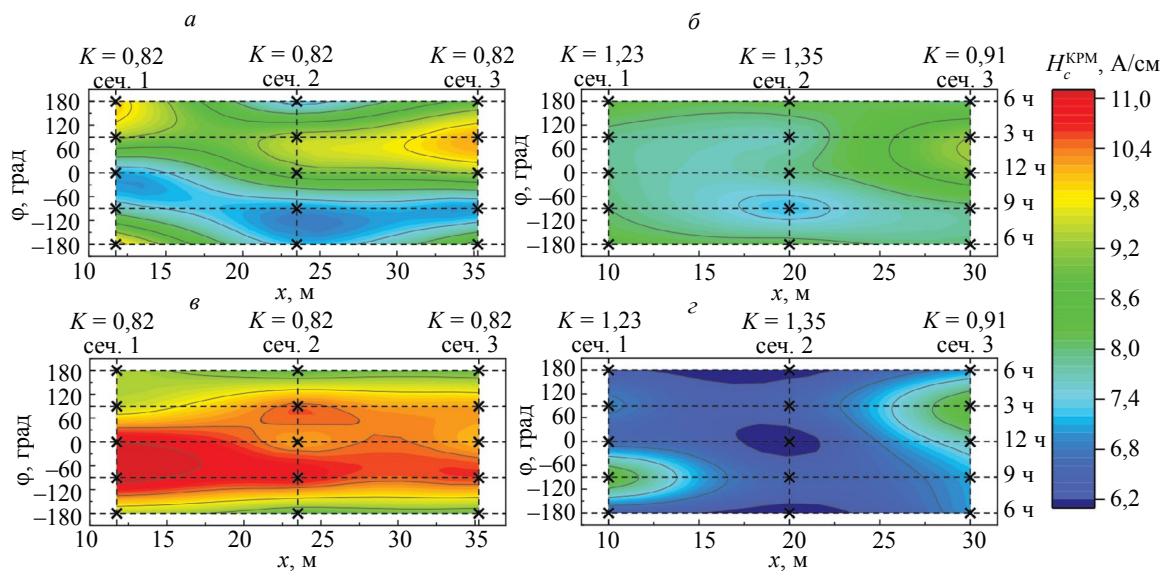


Рис. 9. Распределение (топограммы) коэрцитивной силы по трубам «А» (*а, в*) и «Б» (*б, з*), измеренной по оси (*а, б*) и кольцу (*в, з*) с помощью КМТ-Ц-К2М.

По рис. 9 видно, что по всем сторонам трубы в сечении с $K = 0.91$ значения H_c^{KPM} , измеренные по кольцу, значительно ниже, чем в сечениях с $K = 0.82$. При этом значения H_c^{KPM} слабо зависят от K в диапазоне от 0,91 до 1,35, а наилучшая чувствительность наблюдается на 3 и 12 ч. По оси тенденция к уменьшению H_c^{KPM} при увеличении K видна только на 3 ч, а по остальным сторонам такой тенденции не наблюдается.

Анализируя цветовые карты распределения магнитных характеристик, показанные на рис. 6—9, можно сделать следующие выводы:

1. По рис. 6 можно сделать предположение о том, что показания B_m по кольцу ниже, чем по оси, потому что перемагничивание по кольцу может происходить не по предельной петле гистерезиса. Это говорит о том, что измерения с помощью приставного преобразователя лучше проводить по оси трубы, либо использовать специальные наконечники при измерениях по кольцу.

2. По оси наибольший градиент значений H_c , измеренных с помощью ММТ-3, наблюдался на 3 и 12 ч (рис. 7 a , δ), а значений B_r — на 12 ч (рис. 8 a , δ).

3. По кольцу наибольший градиент значений H_c наблюдался на 3 ч (рис. 7 ϵ , ε), а значений B_r — на 6 ч (рис. 8 ϵ , ε).

4. При измерении с помощью КРМ-Ц-К2М наибольший градиент по оси наблюдался на 3 ч, а по кольцу — на 3 и 12 ч (см. рис. 9).

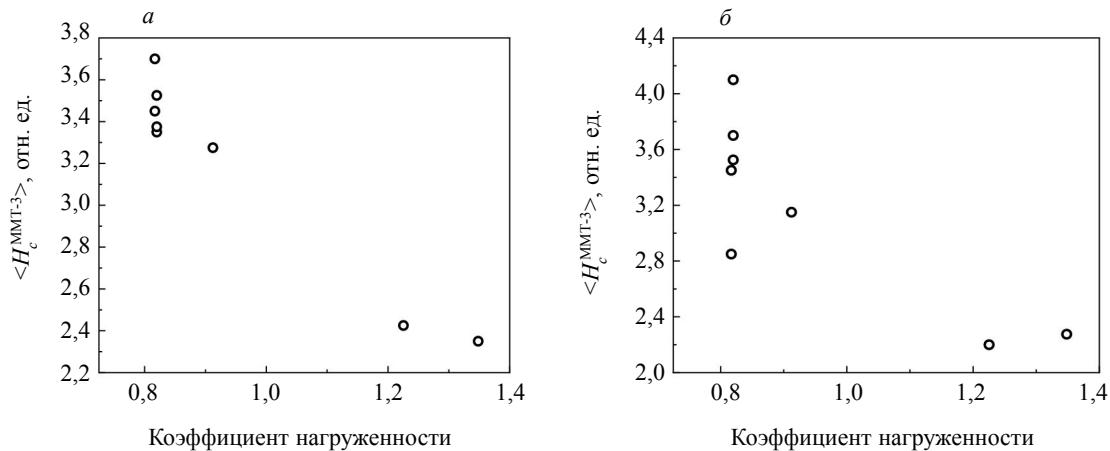


Рис. 10. Зависимость усредненной по четырем зонам в сечении трубы коэрцитивной силы, измеренной с помощью ММТ-3 по оси (a) и по кольцу (δ), от коэффициента нагруженности.

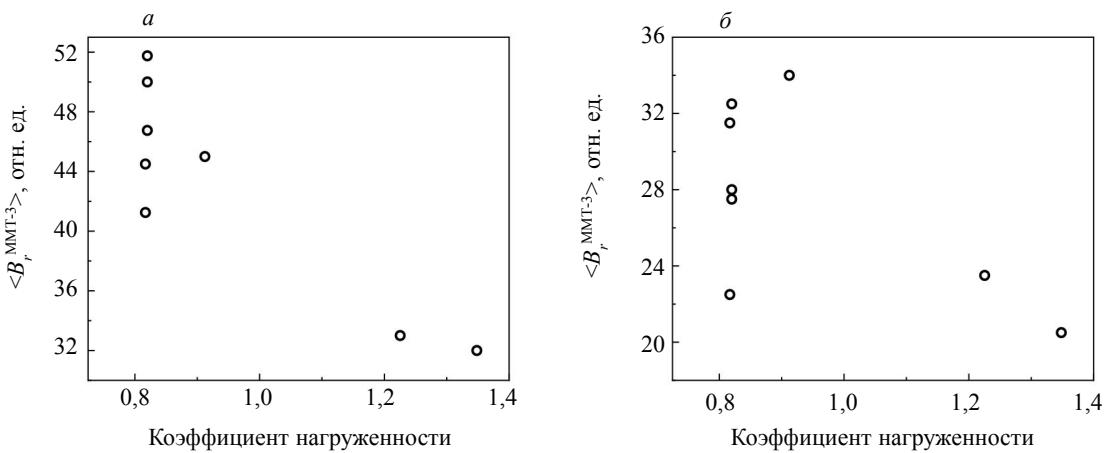


Рис. 11. Зависимость усредненной по четырем зонам в сечении трубы остаточной магнитной индукции, измеренной с помощью ММТ-3 по оси (a) и по кольцу (δ), от коэффициента нагруженности.

На рис. 10—12 показаны усредненные по четырем зонам каждого поперечного сечения (см. рис. 3) значения магнитных характеристик в зависимости от определенного для каждого из этих сечений коэффициента нагруженности, а на рис. 13 — от фибрьных напряжений.

Из рис. 10—12 видно, что результаты измерений, полученные с помощью КРМ-Ц-К2М, не поддаются однозначной трактовке: одному и тому же значению коэрцитивной силы соответствует значение коэффициента нагруженности как меньше 1, так и больше 1,2. Однозначное различие между значениями коэффициента нагруженности в его критических значениях были

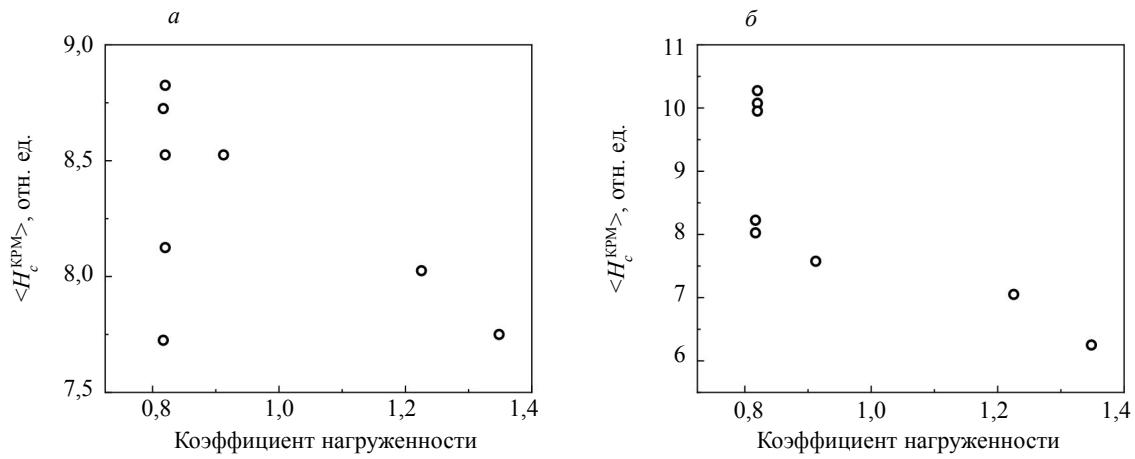


Рис. 12. Зависимость усредненной по четырем зонам в сечении трубы коэрцитивной силы, измеренной с помощью КПМ-Ц-К2М по оси (а) и по кольцу (б), от коэффициента нагруженности.

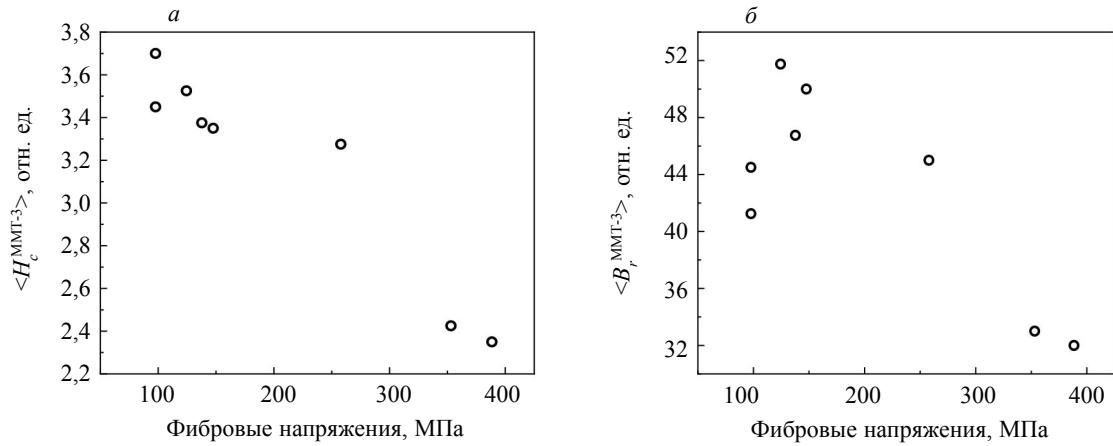


Рис. 13. Зависимость усредненных по четырем зонам в сечении трубы значений коэрцитивной силы (а) и остаточной магнитной индукции (б), измеренной с помощью ММТ-3 по оси, от фибровых напряжений.

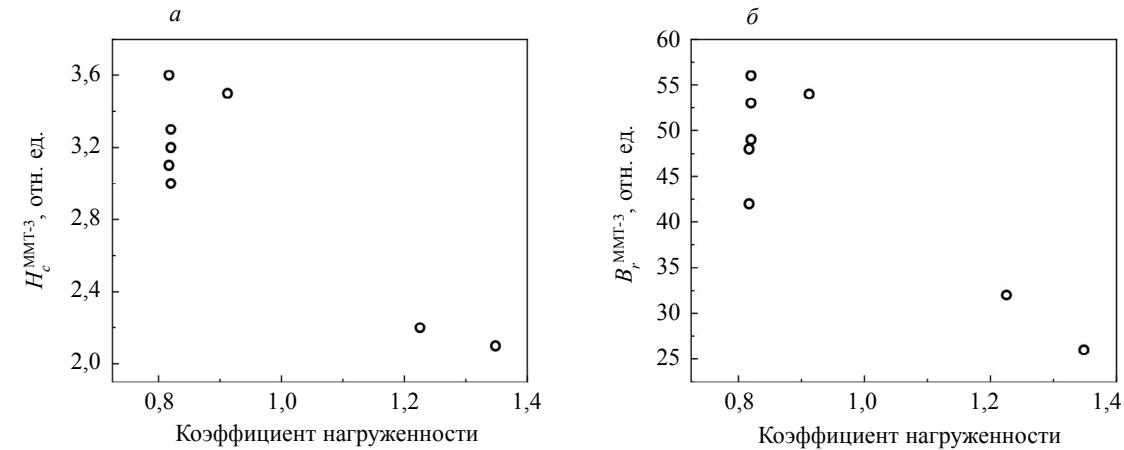


Рис. 14. Зависимость значений коэрцитивной силы (а) и остаточной магнитной индукции (б), измеренных с помощью ММТ-3 по оси, в зонах, расположенных на 12 ч, от коэффициента нагруженности.

получены косвенно по магнитных характеристикам, измеренным прибором ММТ-3 в направлении расположения датчика по оси. По этим результатам видно, что сечения трубопровода, характеризующиеся повышенными значениями коэффициента нагруженности и фибровых напряжений, отличаются от слабонагруженных сечений пониженными значениями H_c и B_r .

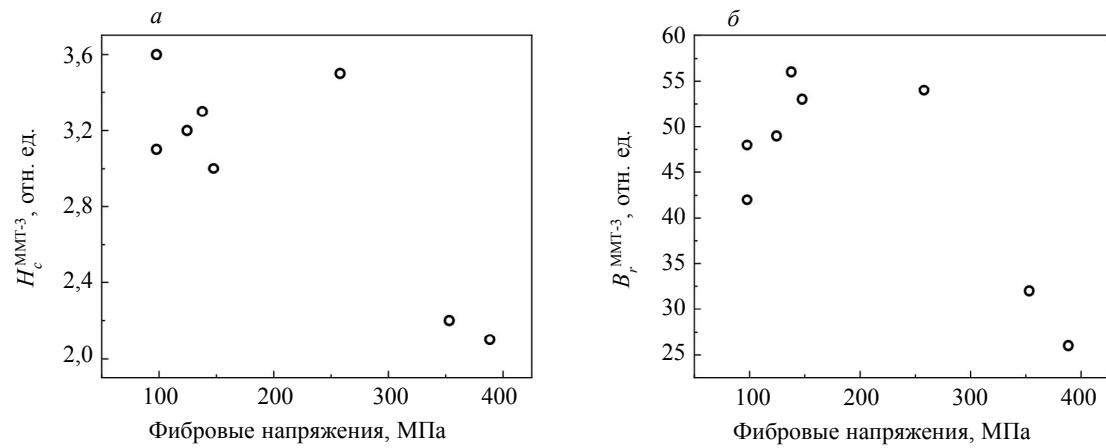


Рис. 15. Зависимость значений коэрцитивной силы (*а*) и остаточной магнитной индукции (*б*), измеренных с помощью ММТ-3 по оси, в зонах, расположенных на 12 ч, от фибровых напряжений.

Из рис. 13 видно, что коэрцитивная сила H_c монотонно убывает с увеличением фибровых напряжений, а при напряжении выше 300 МПа наблюдается резкое падение H_c в 1,4 раза. Значения B_r от фибровых напряжений меняются немонотонно. При напряжениях в диапазоне от 100 до 150 МПа чувствительность B_r к напряжениям значительно выше, чем у H_c .

Рассмотрим наиболее информативные для выявления разницы в значениях коэффициента нагруженности магнитные характеристики (см. рис. 14 и 15, характеристики, измеренные на 12 ч). Полученные зависимости аналогичны зависимостям, показанным на рис. 10, 11, из чего можно сделать заключение о возможности контроля НДС на одной стороне трубы на 12 ч.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что оптимальным местом для определения напряженно-деформированного состояния с помощью магнитных характеристик является сторона на 12 ч, т.е. верхняя часть трубы, а измерения лучше проводить при направлении измерения по оси.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований было установлено:

1. Наиболее опасным для разрушения сечениям, в которых коэффициент нагруженности превысил критическое значение 1,2, соответствуют измеренные пониженные значения коэрцитивной силы и остаточной магнитной индукции, полученные при направлении измерения вдоль оси трубопровода.

2. Измерение одновременно двух параметров петли магнитного гистерезиса, а именно коэрцитивной силы и остаточной магнитной индукции, позволит повысить достоверность контроля и чувствительность к напряженно-деформированному состоянию, избежать ошибок в интерпретации полученных результатов.

3. Оптимальным местом для определения напряженно-деформированного состояния с помощью магнитных характеристик является сторона на 12 ч, т.е. верхняя часть трубы, а измерения необходимо проводить при намагничивании вдоль оси трубы.

4. Для измерений вдоль кольца трубопровода перспективным является создание специальных наконечников, которые позволят усилить контакт между образцом и преобразователем.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России по теме «Диагностика», № 122021000030-1 и договора о сотрудничестве № 05с/22 от 15 ноября 2022 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Игнатик А.А. Расчетно-экспериментальная оценка напряженного состояния трубопровода под воздействием изгибающей нагрузки и внутреннего давления // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2021. № 2 (146). С. 114—126.
- Игнатик А.А. Характеристика напряженно-деформированного состояния стенки трубопровода под воздействием внутреннего давления, изгиба и кручения // Газовая промышленность. 2020. № 4 (799). С. 102—107.
- Рекомендации по оценке прочности и устойчивости эксплуатируемых МГ и трубопроводов КС / дата введения 24.11.2006. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2007. 42 с.

4. СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы. М.: ФГУП ЦПП, 2005. 60 с.
5. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. М.: Госстрой, 2013. 93 с.
6. Захаров В.А., Ульянов А.И., Горкунов Э.С. Коэрцитивная сила ферромагнитных сталей при двухосном симметричном растяжении материала // Дефектоскопия. 2011. № 6. С. 3—15.
7. Безлюдько Г.Я., Соломаха Р.Н., Савлук С.В., Сирота В.Е., Сивирюк В.Л. Коэрцитиметрия для мониторинга напряженного и усталостного состояния кожуха доменной печи // В мире неразрушающего контроля. 2021. Т. 24. № 3 (93). С. 32—35.
8. Безлюдько Г.Я., Мужицкий В.Ф., Ремезов В.Б. Серия портативных приборов-структуроскопов, основанных на измерении величины коэрцитивной силы // Дефектоскопия. 2003. № 4. С. 43—51.
9. IEC 60404-4 Magnetic materials — Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of magnetically soft materials.
10. Горкунов Э.С., Мушников А.Н. Магнитные методы оценки упругих напряжений в ферромагнитных стальах (обзор) // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23. № 12 (270). С. 4—23.
11. Агиней Р.В., Теплинский Ю.А., Кузьбожев А.С., Богданов Н.П. Применение магнитного метода для оценки напряженного состояния стальных конструкций // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2004. № 27. С. 95—97.
12. Андронов И.Н., Агиней Р.В., Леонов И.С. Анализ плосконапряженного состояния стальных трубопроводов по лепестковым диаграммам коэрцитивной силы // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 12. С. 50—52.
13. Stashkov A.N., Schapova E.A., Nichipuruk A.P., Korolev A.V. Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel // NDT & E International. 2021. V. 118. P. 102398.
14. Schapova E.A., Stashkov A.N., Tsar'kova T.P., Sazhina E.Y., Kochnev A.V. The comparison of two data processing techniques of magnetic method for elastic compressive stress determination // AIP Conference Proceedings: The VI International Young Researchers Conference Physics, Technologies Innovation, Ekaterinburg, May 20—23, 2019 / Ural Federal University. V. 2174. Ekaterinburg: American Institute of Physics, 2019. P. 020167.
15. Костин В.Н., Василенко О.Н., Бызов А.В. Мобильная аппаратно-программная система магнитной структуроскопии DIUS-1.15M // Дефектоскопия. 2018. № 9. С. 47—53.
16. Костин В.Н., Смородинский Я.Г. Многоцелевые аппаратно-программные системы активного электромагнитного контроля как тенденция // Дефектоскопия. 2017. № 7. С. 23—34.
17. Костин В.Н., Василенко О.Н., Михайлов А.В., Лукиных Н.П., Ксенофонтов Д.Г. О преимуществах локального измерения коэрцитивной силы ферромагнитных объектов по внутреннему полю // Дефектоскопия. 2020. № 7. С. 21—27.
18. Ничипурук А.П., Бида Г.В., Шанаурин А.М., Сташков А.Н. О функциональных возможностях магнитного структуроскопа СМ-401 // Дефектоскопия. 2003. № 1. С. 3.
19. Костин В.Н., Царькова Т.П., Ничипурук А.П., Лоскутов В.Е., Лопатин В.В., Костин К.В. Не обратимые изменения намагниченности как индикаторы напряженно-деформированного состояния ферромагнитных объектов // Дефектоскопия. 2009. № 11. С. 54—87.
20. ГОСТ 19281—2014 Прокат повышенной прочности. Общие технические условия.
21. Горкунов Э.С., Захаров В.А. Коэрцитиметры с приставными магнитными устройствами (Обзор) // Дефектоскопия. 1995. № 8. С. 69—88.
22. ГОСТ Р 57512—2017 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Термины и определения.

REFERENCES

1. Ignatik A.A. A computational and experimental assessment of the pipeline stress state under bending load and internal pressure // Oil and Gas Studies. 2021. No. 2. P. 114—126.
2. Ignatik A.A. Stress-strain state characteristics of pipeline wall under the internal pressure, bending, and torsion // Gas Industry Journal. 2020. No. 4. P. 102—107.
3. Recommendations on assessment of strength and stability of operated gas mains and pipelines of compressor stations / Effective as of 24 November 2006. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2007. 42 p.
4. SNiP (Building Codes and Regulations) 2.05.06-85. Trunk pipelines, Moscow: FGUP TSPP, 2005, 60 p.
5. SP (Set of Rules) 36.13330.2012. Trunk pipelines, Moscow: Gosstroy, 2013. 93 p.
6. Zakharov V.A., Ul'yanov A.I., Gorkunov E.S. Coercive force of ferromagnetic steels under the biaxial symmetrical tension of a material // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2011. V. 47. No. 6. P. 359—368.
7. Bezlyud'ko G.Y., Sirona V.E., Solomakha R.N., Savluk S.V., Siviruk V.L. Coercimetry for stress-stain and fatigue state monitoring of blast furnace shell // NDT World. 2021. V. 24. No. 3. P. 32—35.
8. Bezlyud'ko G.Y., Muzhitskii V.F., Remezov V.B. Series of portable structuroscope-instruments based on measuring the coercive force // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2003. V. 39. No. 4. P. 43—51.
9. IEC 60404-4 Magnetic materials — Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of magnetically soft materials.
10. Gorkunov E.S., Mushnikov A.N. Magnetic methods of evaluating elastic stresses in ferromagnetic steels (review) // Testing. Diagnostics. 2020. V. 23. No. 12. P. 4—23.

-
11. Aginei R.V., Teplinsky Yu.A., Kuzbozhev A.S., Bogdanov N.P. Application of magnetic method to assess the stress state of steel structures // Journal of Samara State Technical University. Ser. Physical and Mathematical Sciences. 2004. No. 27. P. 95—97.
 12. Andronov I.N., Aginei R.V., Leonov I.S. Analysis of the plane stress state of steel pipelines by the radar charts of the coercivity // Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials. 2013. V. 79. No. 12. P. 50—52.
 13. Stashkov A.N., Schapova E.A., Nichipuruk A.P., Korolev A.V. Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel // NDT & E International. 2021. V. 118. P. 102398.
 14. Schapova E.A., Stashkov A.N., Tsar'kova T.P., Sazhina E.Y., Kochnev A.V. The comparison of two data processing techniques of magnetic method for elastic compressive stress determination // AIP Conference Proceedings: The VI International Young Researchers Conference Physics, Technologies Innovation, Ekaterinburg, May 20–23, 2019 / Ural Federal University. V. 2174. Ekaterinburg: American Institute of Physics, 2019. P. 020167.
 15. Kostin V.N., Vasilenko O.N., Byzov A.V. DIUS-1.15M Mobile Hardware–Software Structuroscopy System // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 9. P. 654—661.
 16. Kostin V.N., Smorodinskii Y.G. Multipurpose software-hardware systems for active electromagnetic testing as a trend // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. V. 53. No. 7. P. 493—504.
 17. Kostin V.N., Vasilenko O.N., Mikhailov A.V., Lukinykh N.P., Ksenofontov D.G. On the advantages of local measurement of coercive force of ferromagnetic objects based on internal field // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 7. P. 574—580.
 18. Nichipuruk A.P., Bida G.V., Shanaurin A.M., Stashkov A.N. Functional Possibilities of SM-401 Magnetic Structuroscope // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2003. V. 39. No. 1. P. 1—9.
 19. Kostin V.N., Tsar'kova T.P., Loskutov V.E., Kostin K.V., Nichipuruk A.P., Lopatin V.V. Irreversible changes in the magnetization as indicators of stressed-strained state of ferromagnetic objects // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2009. V. 45. No. 11. P. 786—796.
 20. GOST (State Standard) 19281—2014 Rolled steel of increased strength. General technical conditions.
 21. Gorkunov E.S., Zakharov V.A. Coercimeters with magnetic attachments (review) // Russian Journal of Nondestructive Testing. 1995. V. 31. No. 8. P. 625.
 22. GOST (State Standard) R 57512—2017 Main pipeline transportation of oil and petroleum products. Terms and definitions.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ
И ДИАГНОСТИКЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ АССОЦИАЦИИ АКАДЕМИЙ НАУК
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ЦЕНТР КОМПЕТЕНЦИИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ
«IT-АКАДЕМГРАД»
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ**

**Международная научно-практическая конференция
«МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
В ДИАГНОСТИКЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ»
4—5 декабря 2024 года, Минск, Республика Беларусь**

ИНФОРМАЦИОННОЕ СООБЩЕНИЕ

Уважаемые коллеги!

Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси и Центр компетенции в интеллектуальных технологиях «IT-АКАДЕМГРАД» под эгидой Научного совета по неразрушающему контролю и диагностике Международной ассоциации академий наук проводит 4—5 декабря 2024 г. международную научно-практическую конференцию «Методы обработки сигналов в технической диагностике сложных систем».

Тематика докладов конференции включает вопросы обработки сигналов, компьютерного моделирования поведения диагностируемых систем на различных структурных уровнях, моделирования и верификации сложносоставных диэлектрических сред и биологических тканей, взаимодействия функциональных материалов с радиационным, ультразвуковым и электромагнитным излучением высокочастотного диапазона, оценки защищенности широкополосных каналов связи.

Планируется проведение круглого стола для обсуждения наиболее актуальных проблем обработки сигналов и мониторинга сложных систем.

Регистрационный взнос для участия в конференции отсутствует.

Тезисы докладов будут представлены на сайте Института прикладной физики НАН Беларуси (<http://iaph.bas-net.by>) и опубликованы в виде сборника после конференции.

Избранные доклады будут рекомендованы к публикации в журналах “Nonlinear Phenomena in Complex Systems” (<http://www.j-npcs.org>) и “Неразрушающий контроль и диагностика” (<http://science.by/nauka/13>).

Рабочие языки конференции — русский и английский. Русскоязычные авторы подают тезисы на обоих языках по приведенным требованиям.

Крайний срок подачи тезисов докладов: **20 ноября 2024 г.**

Ответственный секретарь организационного комитета

Гаркун А.С. (garkun@iaph.bas-net.by),

Институт прикладной физики НАН Беларуси (г. Минск, ул. Академическая, 16).

ВНИМАНИЕ

В журнале Дефектоскопия № 9 2024 года в статье А.А. Комарский, С.Р. Корженевский, А.В. Пономарев, А.С. Чепусов, В.В. Криницин, О.Д. Красный «СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ДВУХЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ» в разделе ЗАКЛЮЧЕНИЕ была пропущена таблица 1.

Т а б л и ц а 1
Отношение сигнал/шум для разных методов изменения спектрального состава

Метод изменения спектров для двухэнергетической обработки	Толщина образца 5 мм			Толщина образца 10 мм		
	Частица 2 мм	Частица 3 мм	Частица 5 мм	Частица 2 мм	Частица 3 мм	Частица 5 мм
E[145]_E[105]	0,24	1,2	3,5	0,3	0,3	1,2
E[145_Cu]_E[145]	4,4	10,4	24,2	0,7	4,9	17,3
E[145_Cu]_E[105]	3,5	9,9	32,7	1,5	6,2	19,5

Редакция