

**ДЕФЕКТОСКОПИЯ**

Журнал ежемесячный  
 Основан в феврале 1965 года  
 Екатеринбург

**№ 10**  
**2021**

**СОДЕРЖАНИЕ****Акустические методы**

- А.О. Ватульян, О.В. Явруян.** Колебания слоя с расслоением в рамках градиентной теории упругости ..... 3
- А.С. Мартюгов, Е.В. Ершов, И.А. Варфоломеев, Д.В. Богачев, Л.Н. Виноградова.** Метод обработки акустической информации для контроля состояния клапанов газоочистного оборудования.... 16
- С.Л. Звонарев, А.И. Зубко, А.А. Зубко.** Диагностика вибрационного состояния роторов двухконтурного турбореактивного двигателя с применением фазочастотной характеристики, полученной без использования датчика положения вала ..... 25

**Электромагнитные методы**

- В.В. Павлюченко, Е.С. Дорошевич.** Контроль дефектов в прошедшем через металл импульсном магнитном поле ..... 35
- А.А. Беспалько, Д.Д. Данн, М.В. Петров, Е.К. Помишин, Г.Е. Уцын, П.И. Федотов.** Электромагнитные методы контроля изменений напряженно-деформированного состояния диэлектрических материалов ..... 44

**Радиационные методы**

- С.В. Панкин, А.И. Сюрдо.** Портативная радиометрическая система, ее основные элементы и варианты применения ..... 55
- С.П. Осипов, Е.Ю. Усачев, С.В. Чахлов, О.С. Осипов.** Имитационная модель исследования структуры объекта методом послылой цифровой комптоновской радиографии ..... 62
- Информация ..... 75



## КОЛЕБАНИЯ СЛОЯ С РАССЛОЕНИЕМ В РАМКАХ ГРАДИЕНТНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

© 2021 г. А.О. Ватульян<sup>1,2,\*</sup>, О.В. Явруян<sup>2,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Южный федеральный университет, Россия 344000 Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8а

<sup>2</sup>Южный математический институт ВНЦ РАН, Россия 362001 Владикавказ, ул. Ватулина, 53

E-mail: \*vatulyan@aanet.ru; \*\*yavruyan@mail.ru

Поступила в редакцию 26.07.2021; после доработки 18.08.2021

Принята к публикации 18.08.2021

Рассмотрена прямая задача об антиплоских колебаниях слоя с расслоением в рамках градиентной теории упругости. В качестве математической модели взята градиентная модель, предложенная Айфантисом. Основное внимание уделено анализу механических полей на берегу трещины и в ее вершинах — концентраторах напряжений. Исследование проведено с использованием метода граничных интегральных уравнений (ГИУ). Построено ГИУ относительно градиента поля перемещений на трещине. Проведен анализ построенного ГИУ, выявлена явным образом кубическая сингулярность. Решение сингулярного ГИУ построено с использованием аппроксимирующих полиномов Чебышева. Проведено исследование для трещин малой относительной длины — асимптотический подход, получены простые полуаналитические выражения для построения функции раскрытия трещины, выявлен диапазон работоспособности асимптотического подхода. Построены поля напряжений в окрестности вершин трещины. Представлены численные результаты вычислительных экспериментов.

*Ключевые слова:* слой, трещина, градиентная теория упругости, колебания, асимптотический метод, установившийся режим, упругий.

DOI: 10.31857/S0130308221100018

### ВВЕДЕНИЕ

Слоистые структуры варьируются от однослойных однородных до многослойных композиций и функционально-градиентных структур (ФГС) и активно используются при моделировании современных материалов с улучшенными свойствами. На сегодняшний день конструктивные элементы, имеющие слоистую структуру, широко востребованы в современной авиационной и аэрокосмической промышленности, в сфере изготовления ядерных реакторов и котлов, при проектировании специальных высокопрочных строительных материалов и во многих других приоритетных областях науки. Однако стоит отметить, что существуют проблемы, влияющие на эффективность использования, на безопасность и прочность конструкций, элементы которых изготовлены из функционально-градиентных материалов (ФГМ) или слоистых композитов. Одним из существенных факторов, способных значительно снизить эксплуатационную способность конструкции и привести к дальнейшему выходу ее из строя, является наличие микродефектов в местах сварки или склейки слоев. Поэтому уточненные математические модели, описывающие реальное поведение слоистых сред с дефектами и позволяющие построить и оценить напряженно-деформированное состояние (НДС) в окрестности вершин трещин, особенно актуальны.

К таким математическим моделям относятся модели неклассической теории упругости — градиентной теории упругости (ГТУ), в которых определяющие соотношения включают в себя градиентные параметры, соотносимые с размерными параметрами исследуемой области, например, с длиной дефекта, толщиной покрытия или микрослоя и т.д., что позволяет учитывать масштабные микроэффекты, уточнять поведение в окрестности интересующих подобластей. Градиентная теория упругости была впервые предложена в середине прошлого века в работах Миндлина, Айфантиса, Тупина, Лурье [1—4]. В отличие от классической теории упругости, в градиентной теории упругости плотность энергии деформации зависит не только от тензора деформаций, но и от первого градиента деформации. Таким образом, полученные определяющие соотношения и уравнения равновесия/движения имеют более высокий порядок. Однако наряду с возможностью описать более точное поведение объекта исследования (особенно в окрестности концентраторов напряжений) возникает ряд сложностей, связанных с исследованием дифференциальных операторов более высокого порядка и выбором параметров градиентной модели. Поэтому дальнейшие исследования были связаны с упрощением многопараметрической градиентной модели и сокращением числа характерных градиентных параметров.

Так, в работах Aifantis и его соавторов [5, 6] была предложена упрощенная модель градиентной теории упругости — одна/двух/трехпараметрические модели для статических и динамических задач, адекватно описывающие реальное поведение объекта исследования.

Статические задачи для тел с трещинами в рамках моделей градиентной теории упругости представлены в работах G. Exadaktylos, I. Vardoulakis и E. Aifantis [6—8], F. Erdogan, Gupta [9, 10], L. Zhang, Y. Huang и J.Y. Chen [11,12], G.H. Paulino [13, 14]. Исследованы статические задачи о трещинах моды I, II, III в однородных или неоднородных, функционально-градиентных средах. Получены граничные интегральные уравнения относительно скачков полей смещений на берегах трещины, рассчитаны коэффициенты интенсивности напряжений у вершин трещины, осуществлено сравнение с классическим случаем. В рамках линейной теории упругости задачи теории трещин исследованы в работах [10,15].

В работах C.Q. Ru, E.C. Aifantis [16] предложена новая схема исследования задач механики в рамках градиентной теории упругости, так называемый метод Ру—Айфантиса, позволяющий перейти от сингулярных решений к регулярированным в два этапа. На первом этапе строятся решения классической теории упругости, далее рассматриваются дифференциальные уравнения более высокого порядка относительно градиентных решений, в правой части которых стоят соответствующие решения классической теории упругости. В результате данного подхода удается исключить сингулярность в полях напряжений и получить новые критерии разрушения.

Также авторами С.А. Лурье, В.В. Васильевым [17, 18] предложена эффективная обобщенная модель для исследования задач теории упругости, в которых возникают сингулярные решения. Уравнения градиентной теории упругости имеют более высокий порядок по сравнению с уравнениями классической теории, однако, в отличие от традиционных неклассических теорий с большим числом дополнительных параметров (например, градиентных параметров), включают независимо от порядка уравнений всего лишь одну дополнительную постоянную, выражающуюся через микроструктурный параметр среды и не требует введения дополнительных моментных напряжений. Обобщенная теория развита для одномерных, двумерных и трёхмерных задач, сформулированы основные уравнения, учитывающие градиенты напряжений и записывающиеся в терминах обобщенных напряжений, деформаций и перемещений. Также основным прорывным моментом предлагаемой теории является возможность экспериментального определения параметра обобщенной модели и верификация полученных теоретических результатов с результатами экспериментов.

Отметим, что статические задачи теории трещин в рамках ГТУ исследованы достаточно подробно, однако, динамические задачи решены в меньшем количестве, поскольку их решение становится на порядок сложнее. Как правило, основное внимание исследователей направлено на решение динамических задач для балок, труб, пластин. Возможности развития градиентной теории упругости для динамических задач, полный обзор градиентной теории упругости для статических и динамических задач, возможности определения градиентных параметров, обсуждение вопросов применения конечно-элементных методов решений в рамках ГТУ обсуждены в работе [19]. В этой же работе приведены основные уравнения ГТУ для динамических задач.

Основной целью исследования является изучение возможности применения неклассических теорий к динамическим задачам теории трещин, в частности, к задаче о колебаниях однородного слоя с расслоением. В статической постановке в рамках градиентной теории упругости такая задача была решена многими авторами [8, 11, 13], в данной работе предложенные методы исследования задачи были развиты и для динамической задачи градиентной теории упругости. Проведено исследование задачи в рамках однопараметрической градиентной модели Айфантиса, применен асимптотический подход к решению поставленной задачи, который опирается на предположение о малости относительного размера дефекта. Асимптотический подход позволяет существенно упростить решение задач теории трещин и получить полуаналитические решения, удобные для дальнейшего исследования, подобная схема исследования была апробирована авторами для задач теории трещин в рамках линейной классической теории упругости и вязкоупругости при исследовании прямых и обратных задач о колебаниях слоя с внутренней туннельной прямолинейной или криволинейной трещиной, а также трещиной, расположенной на стыке двух областей и слоя с расслоением [21—25].

Определяющие соотношения классической линейной теории упругости для однородной среды представлены следующими зависимостями между напряжениям Коши и деформациями, которые носят линейный характер:

$$\tau_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (2)$$

Для градиентной теории упругости [7, 8], в отличие от классической линейной теории упругости, формулируется линейная зависимость между компонентами тензора напряжений Коши и компонентами тензоров деформации и их градиентами, что позволяет в дальнейшем использовать эти соотношения в задачах, где требуется более уточненное и детальное описание объекта исследования на микроструктурном уровне. В связи с увеличением порядка определяющих соотношений также вводятся дополнительные моментные напряжения.

В общем случае градиентной теории упругости, которая впервые была предложена Миндлином в 1964 г., плотность энергии деформации представлена многопараметрической моделью:

$$W = \frac{1}{2}\lambda\varepsilon_{ii}\varepsilon_{jj} + \mu\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ji} + a_1\varepsilon_{ik,i}\varepsilon_{jj,k} + a_2\varepsilon_{jj,i}\varepsilon_{kk,i} + a_3\varepsilon_{ik,i}\varepsilon_{jk,j} + a_4\varepsilon_{jk,i}\varepsilon_{jk,i} + a_5\varepsilon_{jk,i}\varepsilon_{ij,k}, \quad (3)$$

а также уточненное представление кинетической энергии:

$$T = \frac{1}{2}\rho\dot{u}_i\dot{u}_i + \frac{1}{2}\rho l_1^2\dot{u}_{i,j}\dot{u}_{i,j}. \quad (4)$$

Коэффициенты модели  $l, a_i$  — градиентные параметры.

Компоненты тензоров напряжений Коши, моментных напряжений и полных напряжений определяются соответственно:

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= \partial W / \partial \varepsilon_{ij}; \\ m_{ijk} &= \partial W / \partial \varepsilon_{ij,k}; \\ \sigma_{ij} &= \tau_{ij} - m_{ijk,k}. \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнения движения, принимая во внимание соотношения приведенные выше, принимают вид [19]:

$$\begin{aligned} (\lambda + \mu)(1 - l_2^2 \nabla^2) u_{j,j} + \mu(1 - l_3^2 \nabla^2) u_{i,j} &= \rho(1 - l_1^2 \nabla^2) \ddot{u}_i; \\ l_2^2 &= \frac{4a_1 + 4a_2 + 3a_3 + 2a_4 + 3a_5}{2(\lambda + \mu)}; \\ l_3^2 &= \frac{a_3 + 2a_4 + a_5}{2\mu}. \end{aligned} \quad (6)$$

Отметим, что параметры  $l_1, l_2, l_3$  — характерные длины, определяемые градиентными эффектами.

Дальнейшие упрощения градиентных соотношений были предложены Айфантисом ( $l_1 = l_2 = l_3 = l$ ) [19]:

$$W = \frac{1}{2}\lambda\varepsilon_{ii}\varepsilon_{jj} + \mu\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ji} + \frac{1}{2}\lambda l^2\varepsilon_{jj,i}\varepsilon_{kk,i} + \mu l^2\varepsilon_{jk,i}\varepsilon_{jk,i};$$

$$m_{ijk} = \partial W / \partial \varepsilon_{ij,k} = l^2 \tau_{ij,k}; \quad (7)$$

$$\sigma_{ij} = \tau_{ij} - m_{ijk,k} = (1 - l^2 \nabla^2) \tau_{ij}. \quad (8)$$

## 1. ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О КОЛЕБАНИЯХ СЛОЯ С РАССЛОЕНИЕМ

Рассмотрим установившиеся антиплоские колебания изотропного слоя толщины  $h$ , нижняя граница слоя жестко закреплена, за исключением участка с расслоением длины  $2a$ . Колебания

слоя вызваны нагрузкой, приложенной к части верхней границы слоя. Направим оси координат так, чтобы ось  $x_1$  совпала с нижней гранью полосы, а ось  $x_3$  направим перпендикулярно вверх, при этом трещина расположена на нижней границе при  $x_1 \in [-a, a]$ . Рассматривается постановка, в которой расслоение в процессе колебаний остается раскрытым, т.е. поверхность трещины свободна от напряжений. Установившиеся колебания вызываются компонентой вектора касательных напряжений  $\sigma_{23} = p_0 e^{-\omega t}$ , ненулевой компонентой вектора перемещений является компонента  $u_2(x_1, x_3, t) = u(x_1, x_3) e^{-i\omega t}$ . Компоненты тензоров полного и моментного напряжений:

$$\begin{aligned}\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} = 0, \quad \sigma_{13} = 0; \\ \sigma_{2i} = 2\mu(1 - l^2 \nabla^2) \varepsilon_{2i}, \quad i = 1, 3; \\ m_{112} = 2\mu l^2 \varepsilon_{12,1}; \\ m_{132} = 2\mu l^2 \varepsilon_{32,1}; \\ m_{312} = 2\mu l^2 \varepsilon_{12,3}; \\ m_{332} = 2\mu l^2 \varepsilon_{32,3}.\end{aligned}\tag{9}$$

После отделения временного множителя уравнения движения и граничные условия примут вид:

$$(1 - l^2 \nabla^2)(\nabla^2 u + k^2 u) = 0;\tag{10}$$

$$x_3 = h, \quad \sigma_{23} = p_0 \delta(x_1 - L), \quad m_{332}(x_1, 0) = 0;$$

$$x_3 = 0, \quad u = 0, \quad x_1 \notin [-a, a], \quad m_{332}(x_1, 0) = 0,\tag{11}$$

где  $L$  — точка приложения нагрузки (не нарушая общности рассуждений, будем рассматривать случай приложения сосредоточенной нагрузки).

Рассматривается постановка задачи, в которой предполагается, что в процессе колебания трещина остается раскрытой и к постановке задачи добавляется условие отсутствия напряжений на трещине:

$$x_3 = 0, \quad x_1 \in [-a, a], \quad \sigma_{23} = 0.\tag{12}$$

Замыкают постановку задачи условия излучения волн на бесконечности, при формулировке которых используется принцип предельного поглощения [26].

## 2. СВЕДЕНИЕ К ГРАНИЧНОМУ ИНТЕГРАЛЬНОМУ УРАВНЕНИЮ

Рассмотрим вспомогательную задачу, в которой к краевой задаче (10)—(12) добавлены следующие граничные условия [13]:

$$\begin{aligned}x_3 = h, \quad \sigma_{23} = p_0 \delta(x_1 - L), \quad m_{332} = 0, \\ x_3 = 0, \quad u = X, \quad m_{332} = 0, \quad \sigma_{23} = 0, \quad x_1 \in [-a, a],\end{aligned}\tag{13}$$

здесь введена функция  $X$ , характеризующая смещения нижней границы полосы, при этом

$$X = 0, \quad x_1 \notin [-a, a] \quad \text{и} \quad X \neq 0, \quad x_1 \in [-a, a],$$

т.е. она определяет раскрытие трещины.

Рассмотрение вспомогательной задачи дает возможность применения преобразования Фурье по координате  $x_1$ :

$$\tilde{u}(x_3, \xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(x_1, x_3) e^{i\xi x_1} dx_1.$$

В результате, уравнение движения (10) преобразуется к дифференциальному уравнению четвертого порядка ( $D = \frac{\partial}{\partial x_3}$ ):

$$(1 - l^2(D^2 - \xi^2))(D^2 - \xi^2 + k^2)\tilde{u} = 0. \quad (14)$$

Характеристическое уравнение:

$$(1 - l^2(\lambda^2 - \xi^2))(\lambda^2 - \xi^2 + k^2)\tilde{u} = 0. \quad (15)$$

Корни характеристического уравнения:

$$\lambda_{1,2} = \pm\sqrt{\xi^2 + 1/l^2}, \quad \lambda_{3,4} = \pm\sqrt{\xi^2 - k^2}. \quad (16)$$

Решение (14) представимо в виде:

$$\tilde{u}(\xi, x_3) = \sum_{i=1}^4 a_i(\xi) e^{\lambda_i(\xi)x_3}. \quad (17)$$

Неизвестные функции  $a_i$  определим из граничных условий относительно трансформант:

$$\begin{aligned} x_3 = h, \quad \tilde{\sigma}_{23} = \tilde{p}, \quad \tilde{\sigma}_{23} = \mu D(1 - l^2(D^2 + \xi^2))\tilde{u}, \quad \tilde{p} = p_0 e^{i\xi L}, \quad \tilde{m}_{332} = \mu l^2 D^2 \tilde{u} = 0; \\ x_3 = 0, \quad \tilde{u} = \tilde{X}, \quad \tilde{m}_{332} = \mu l^2 D^2 \tilde{u} = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Таким образом, для определения неизвестных функций в представлении (17) имеем СЛАУ:

$$\begin{aligned} Ay &= F; \\ y^T &= (A, C, B); \\ F^T &= (\tilde{X}, 0, \tilde{p}/\mu, 0); \\ A &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ c_1 & c_1 & c_2 & c_2 \\ -\rho e^{-\lambda_3 h} & \rho e^{\lambda_3 h} & -r e^{-\lambda_1 h} & r e^{\lambda_1 h} \\ c_1 e^{-\lambda_3} & c_1 e^{\lambda_3} & c_2 e^{-\lambda_1} & c_2 e^{\lambda_1} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (19)$$

где  $c_1 = l^2 \lambda_3^2$ ,  $c_2 = l^2 \lambda_1^2$ ,  $\rho = \lambda_3(1 + l^2(\xi^2 - \lambda_3^2))$ ,  $r = \lambda_1(1 + l^2(\xi^2 - \lambda_1^2))$ , из которой можно определить по правилу Крамера соответствующие неизвестные функции:

$$a_i = \frac{1}{\Delta_0} (\tilde{X} a_{iX} + \frac{\tilde{p}}{\mu} a_{ip});$$

$$\Delta_0 = \lambda_1^3 \lambda_3 l^2 e^{(\lambda_1 + \lambda_3)h} (-1 + e^{-2\lambda_1 h} - e^{-2\lambda_3 h} + e^{-2(\lambda_1 + \lambda_3)h}) (1 + l^2 k^2)^2 = -4 \lambda_1^3 \lambda_3 l^2 (1 + l^2 k^2)^2 sh(\lambda_1 h) ch(\lambda_3 h).$$

Уравнение  $\Delta_0 = 0$  характеризует дисперсионное множество, отметим, что точки дисперсионного множества не зависят от  $l$  и соответствуют классическому случаю.

Выражения для  $a_{iX}$ ,  $a_{ip}$  не приводятся в силу громоздкости. После определения коэффициентов, применив обратное преобразование Фурье к (17), получим представление поля смещения в слое

$$u(x_1, x_3) = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^4 \int_{\sigma} a_i(\xi) e^{\lambda_i(\xi)x_3} e^{-i\xi x_1} d\xi. \quad (20)$$

Контур интегрирования  $\sigma$  выбирается в соответствии с принципом предельного поглощения. Он всюду совпадает с вещественной осью за исключением окрестностей вещественных полюсов и отклоняется в комплексную плоскость, огибая положительные полюса снизу, отрицательные сверху. Как видно, каждая из функций  $a_i$  представлена двумя слагаемыми, слагаемые с  $\tilde{p}$  характеризуют волновое поле в полосе без дефекта, вызванное приложенной нагрузкой, а слагаемые с  $\tilde{X}$  определяют вклад дефекта в общее волновое поле в полосе. Отсюда можно найти представление напряжений, в частности:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_{23}(\xi, x_3) &= \frac{\mu}{\Delta} \left[ d_X(x_3, \xi) \tilde{X}(\xi) + d_p(x_3, \xi) \tilde{p}(\xi) \right]; \\ d_X(x_3, \xi) &= \sum_{i=1}^4 f(\lambda_i) a_{iX} e^{\lambda_i x_3}; \\ d_p(x_1, \xi) &= \sum_{i=1}^4 f(\lambda_i) a_{ip} e^{\lambda_i x_3}; \\ f(z) &= z(1 + l^2 z^2) - l^2 z^3.\end{aligned}\quad (21)$$

Неизвестную функцию раскрытия трещины  $X$  найдем из условия отсутствия напряжения на трещине. Для этого осуществим предельный переход в выражении (21) при  $x_3 \rightarrow 0$  и применим обратное преобразование Фурье. В результате получим граничное интегральное уравнение (ГИУ) относительно функции  $\chi(x_1)$ :

$$\begin{aligned}\int_{-a}^a \chi(t) K(t - x_1) dt &= F(x_1); \\ K(t - x_1) &= \int_{\sigma} R(\xi) e^{i\xi(t-x_1)} d\xi, \quad R(\xi) = \frac{d_X(0, \xi)}{\Delta}; \\ F(x_1) &= -\frac{p_0}{\mu} \int_{\sigma} \frac{d_p(0, \xi)}{\Delta} e^{i\xi(L-x_1)} d\xi.\end{aligned}\quad (22)$$

Введем функцию  $\Phi(t) = \chi'(t)$ , удовлетворяющую условиям:

$$\begin{aligned}\Phi(t) &= 0, \quad t \notin (-a, a), \\ \int_{-a}^a \Phi(t) dt &= \chi(a) - \chi(-a) = 0,\end{aligned}$$

а также условиям  $\Phi(a) = \Phi(-a) = 0$  [12]. Тогда получим следующее ГИУ:

$$\begin{aligned}\int_{-a}^a \Phi(t) K_1(t - x_1) dt &= F_1(x_1), \quad |x_1| \leq a; \\ K_1(t - x_1) &= -i \int_{\sigma} R(\xi) \xi^{-1} e^{i\xi(t-x_1)} d\xi, \quad R(\xi) = \frac{d_X(0, \xi)}{\Delta}; \\ F_1(x_1) &= \frac{p_0}{\mu} \int_{\sigma} \frac{d_p(0, \xi)}{\Delta} e^{i\xi(L-x_1)} d\xi.\end{aligned}\quad (23)$$

Ядро ГИУ (23) представлено несобственным интегралом, для исследования поведения подынтегральной функции на бесконечности найдем главные члены разложения:

$$\hat{R}(\xi) = L_1 |\xi| + L_3 |\xi|^3 + (1), \quad |\xi| \rightarrow \infty, \quad (24)$$

$$L_1 = -1 + \frac{l^2 k^2}{2}, \quad L_3 = -l^2.$$

С учетом формул [29], запишем ГИУ (23) в виде:

$$v.p. \frac{1}{\pi} \int_{-a}^a \left( \frac{L_1}{t-x_1} - \frac{2L_3}{(t-x_1)^3} + N(t, x_1) \right) \Phi(t) dt = F_1(x_1); \quad (25)$$

$$N(t, x_1) = -i \int_{\sigma} \left( R(\xi) - L_1 |\xi| - L_3 |\xi|^3 \right) \xi^{-1} e^{i\xi(t-x_1)} d\xi.$$

Полученное ГИУ (25) представлено несобственными интегралами второго рода, т.е. сингулярными интегралами (кубическая сингулярность), соответствующие интегралы не существуют в обычном смысле, а понимаются в смысле главного значения по Коши [28]:

$$\begin{aligned} v.p. \int_{-a}^a \frac{\Phi(t)}{(t-x_1)^3} dt &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left( \int_{-a}^{-\varepsilon} + \int_{\varepsilon}^a \right) \frac{\Phi(t)}{(t-x_1)^3} dt; \\ v.p. \int_{-a}^a \frac{dt}{(t-x_1)^3} &= v.p. \int_{-a-x_1}^{a-x_1} \frac{dy}{y^3} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left( \int_{-a-x_1}^{-\varepsilon} + \int_{\varepsilon}^{a-x_1} \right) \frac{dy}{y^3} = -\frac{1}{2} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} y^{-2} \left( \Big|_{-a-x_1}^{-\varepsilon} + \Big|_{\varepsilon}^{a-x_1} \right) = \\ &= -\frac{1}{2} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left( \frac{1}{\varepsilon^2} - \frac{1}{(a+x_1)^2} + \frac{1}{(a-x_1)^2} - \frac{1}{\varepsilon^2} \right) = -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{(a-x_1)^2} - \frac{1}{(a+x_1)^2} \right). \end{aligned}$$

Регулярная часть ядра  $N$  представлена несобственным интегралом, подынтегральная функция которой на бесконечности убывает и соответствующий контурный интеграл может быть вычислен с использованием квадратурных формул либо по теории вычетов.

Путем замены переменных в (25) и введения безразмерных параметров  $t = a\hat{t}$ ,  $x_1 = a\hat{x}_1$ ,  $\hat{a} = a/h$ ,  $\hat{k} = kh$ ,  $\hat{l} = l/h$  сведем его к ГИУ вида:

$$\frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \left( \frac{L_1}{(\hat{t}-\hat{x}_1)} - \frac{2L_3}{a^2(\hat{t}-\hat{x}_1)^3} + aN(a\hat{t}, a\hat{x}_1) \right) \Phi(\hat{t}) d\hat{t} = F_1(\hat{x}_1), \quad \hat{x}_1 \in [-1, 1], \quad (26)$$

в дальнейших выкладках знак «шапочка» будем опускать.

Решение ГИУ (25) возможно с позиции двух подходов — первая схема численного исследования опирается на квадратурные формулы для гиперсингулярных интегралов и разностные схемы аппроксимации внеинтегрального слагаемого [28]; вторая схема связана с использованием аппроксимирующих полиномов Чебышева первого и второго родов [13]. Будем проводить дальнейшие исследования ГИУ по второй схеме.

Учитывая поведение функции  $\Phi(t)$  в вершинах трещины [12], будем искать решение ГИУ (26) в виде разложения по полиномам Чебышева:

$$\Phi(t) = \sqrt{1-t^2} \sum_{n=0}^{\infty} A_n U_n(t); \quad (27)$$

$$U_n(s) = \frac{\sin((n+1)\arccos(s))}{\sin(\arccos(s))}, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Отметим, что в отличие от линейной теории упругости, когда интегральное уравнение представлено сингулярным интегралом и функция  $\Phi(t)$  разыскивается в виде  $\Phi(t) = g(t)/\sqrt{1-t^2}$ , в градиентной теории упругости за счет появления кубической сингулярности соответствующее решение имеет иную структуру  $\Phi(t) = \sqrt{1-t^2} g(t)$ . Доказать это можно, сведя (27) к интегродифференциальному уравнению, для случая статической задачи исследование интегродифференциального уравнения приведено в работе [12], в которой доказано, что его решение имеет вид (27), этот результат может быть применен также и к динамической задаче к (26). Именно такое представление решения ГИУ позволяет утверждать, что в градиентной теории упругости сингулярная в окрестности вершин трещины компонента тензора деформации линейной теории упругости становится регулярной. Таким образом решение ГИУ сводится к нахождению коэффициентов разложения  $A_n$ .

Подставим (27) в (26), воспользуемся методом коллокаций, удовлетворив уравнение в дискретном наборе точек  $\{x_{i_i}\}_{i=1}^M$ ,  $x_{i_i} \in [-1, 1]$ , а также известными формулами для вычисления интегралов от функций Чебышева [13], в результате получим СЛАУ:

$$\begin{aligned} B \cdot A &= P, \\ A^T &= (A_1, \dots, A_M), \quad P = \{F(x_{i_i})\}_{i=1}^M, \\ B &= \{B_{nj}\}_{i,j=1}^M = -\frac{L_3}{2(1-x_{i_i}^2)} [(n^2+n)U_{n+1}(x_{i_i}) - (2n^2+3n+2)U_{n-1}(x_{i_i})] - \\ &\quad - L_1 T_{n+1}(x_{i_i}) + \frac{a}{\pi} \int_{-1}^1 \sqrt{1-s^2} U_n(s) N(s, x_{i_i}) ds. \end{aligned}$$

Функция раскрытия строится по правилу:

$$\chi(x_1) = \int_{-1}^{x_1} \Phi(s) ds = \sum_{n=1}^M A_n \int_{-1}^{x_1} \sqrt{1-s^2} U_n(s) ds. \quad (28)$$

Таким образом, после нахождения функции раскрытия трещины из (28) можно построить поле смещения всюду в слое по формуле (20).

Поле напряжений вне трещины может быть рассчитано как

$$\sigma_{23}(x_1, x_3 = 0^+) = \frac{\mu}{\pi} \int_{-a}^a \left( \frac{L_1}{t-x_1} - \frac{2L_3}{(t-x_1)^3} + N(t, x_1) \right) \Phi(t) dt, \quad |x_1| > a. \quad (29)$$

Интегралы в выражении (29) уже не являются сингулярными. Наибольший интерес представляет оценка напряженного состояния полосы в окрестности вершин трещины и возможная оценка коэффициента интенсивности напряжений. Если в классической теории упругости напряжения в окрестности вершин дефекта имеют особенность порядка  $1/\sqrt{x_1^2 - a^2}$ , то в случае градиентной теории упругости порядок сингулярности изменяется и имеет порядок  $1/(x_1^2 - a^2)^{3/2}$  [11], коэффициент интенсивности в вершинах трещин может быть рассчитан по формулам [13]:

$$IK_{III}(\pm a) = \lim_{x \rightarrow a^{\pm}} 2\sqrt{2\pi(x \mp a)}(x \mp a)\sigma_{23}(x, 0), \quad (x > a). \quad (30)$$

$$K_{III}(a) = \sqrt{\pi a} (l/a) \sum_{n=1}^{\infty} (n+1) A_n. \quad (31)$$

Были проведены численные расчеты для функции раскрытия трещины при различных значениях градиентных параметров и частоты колебания (рис. 1, рис. 2). Сплошными линиями обозначены графики, соответствующие градиентной модели, точками — классическому случаю. Можно заметить, что как и в статическом случае [13], с увеличением градиентного параметра раскрытие трещины меньше, чем в классическом случае. Также в случае градиентной модели при увеличении значений градиентных параметров меняется геометрия профиля раскрытия при приближении к вершинам. На рис. 3 приведены графики вещественной части напряжений  $\sigma_{23}(x, 0)$  в окрестности правой вершины трещины. Как видно из графиков, имеется комбинация градиентных параметров, при которых наблюдается локальный максимум у графиков, именно значения в этих точках и может быть использовано в качестве новых критериев прочности относительно НДС и значения коэффициента интенсивности напряжений.

### 3. АСИМПТОТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАДАЧИ

Рассмотрим предложенный для линейной теории упругости асимптотический подход [21—25] к исследованию задачи в рамках градиентной теории упругости. В основе асимптотического подхода лежит предположение о малости относительного размера дефекта, что в линейной теории упругости позволяло значительно упростить схему нахождения функций раскрытия трещины и построения волновых полей в слое.

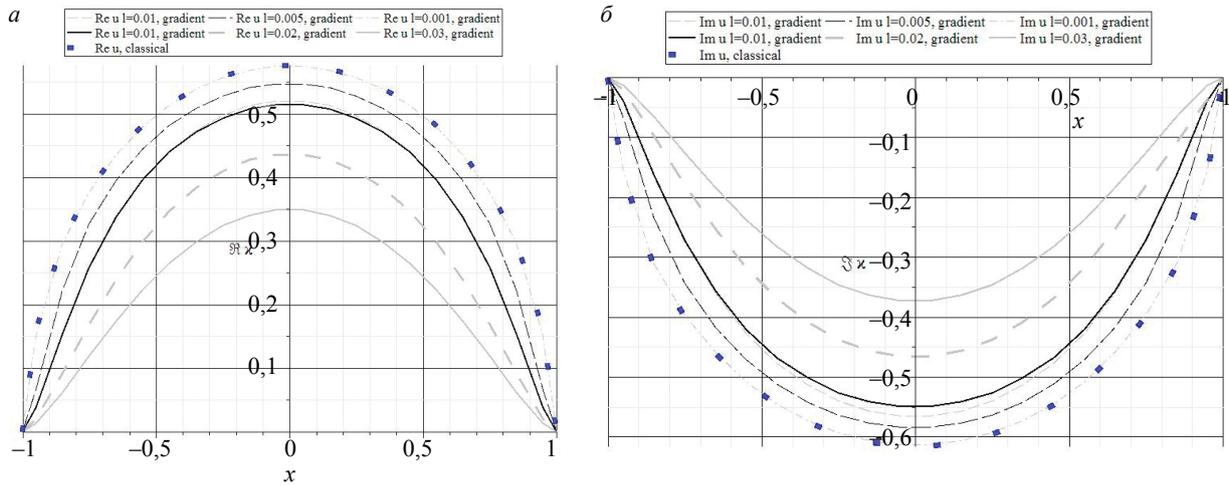


Рис. 1. Вещественная (а) и мнимая (б) части функции раскрытия трещины при  $k = 5$ ;  $a = 0,1$ ;  $L = 0,0$ .

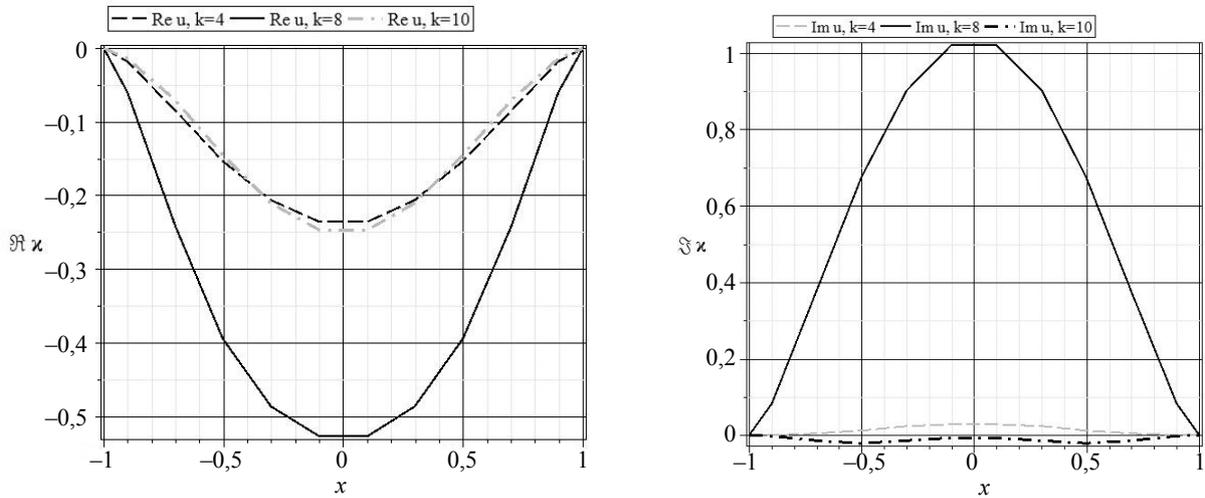


Рис. 2. Вещественная (а) и мнимая (б) части функции раскрытия трещин для различных значений волнового числа  $k$  (одна, две и три волны соответственно),  $a = 0,1$ ;  $l = 0,05$ ;  $l_1 = 0,001$ ;  $L = 0$ .

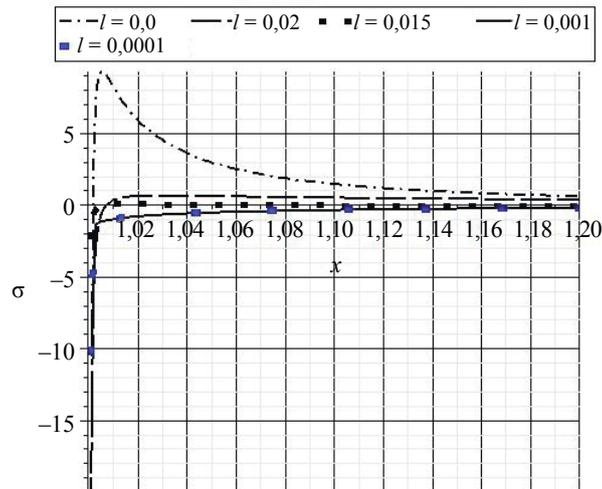


Рис. 3. Графики вещественного значения напряжения в окрестности правой вершины трещины при различных значениях параметра  $l$  при  $a = 0,1$ ;  $k = 0,1$ .

Проведем анализ ГИУ (26) для трещины малого относительного размера, т.е. при  $a \rightarrow 0$ . Предельное значение правой части ГИУ с учетом предположения представляет собой постоянную величину, определяемую выражением:

$$F_c = \lim_{a \rightarrow 0} F_1(x_1) = -\frac{p_0}{\mu} \int_{\sigma} \frac{d_p(0, \xi)}{\Delta} e^{i\xi L} d\xi = -\frac{p_0}{\mu\sqrt{2\pi}} 2\pi i \sum_{\xi=\xi_i} \frac{d_p(0, \xi_i)}{\Delta'_\xi(\xi_i)} e^{i\xi_i L}, \quad (32)$$

где  $\xi_i$  — полюса подынтегральной функции, сам же интеграл может быть посчитан по теории вычетов.

Также с учетом предположения  $a \rightarrow 0$  можно исключить из ГИУ слагаемое, отвечающее за регулярную часть подынтегрального выражения. Таким образом, имеем ГИУ вида:

$$-\frac{2}{\pi} \left(\frac{l}{a}\right)^2 \int_{-1}^1 \frac{\Phi(t)}{(t-x_1)^3} dt + \frac{1}{\pi} \left(1 - \frac{l^2 k^2}{2}\right) \int_{-1}^1 \frac{\Phi(t)}{t-x_1} dt = -F_n, \quad x_1 \in [-1, 1]. \quad (33)$$

Дальнейшее исследование ГИУ (33) сводится к выделению доминирующих интегральных слагаемых в левой части (33), которые определяются поведением трех параметров:  $a, l, k$ . Стоит отметить, что определяющим будет поведение множителя  $l/a, l \rightarrow 0, a \rightarrow 0$ , поскольку  $1 - l^2 k^2/2$  при малых  $l$  ограничено сверху, однако рассмотрим более общий случай, учитывающий влияние волнового числа  $k$ .

Введем в рассмотрение параметр  $\kappa^2 = \left(1 - \frac{l^2 k^2}{2}\right) / \left(\frac{l}{a}\right)^2$  и три характерных случая:

I)  $\kappa^2 \ll 1$ , т.е.  $l \gg \left(\frac{2}{a^2} + \frac{k^2}{2}\right)^{-1/2}$ . Тогда в ГИУ (33) доминирующим интегральным слагаемым

является слагаемое, соответствующее интегралу с кубической сингулярностью, и граничное интегральное уравнение, ввиду предположения о малости относительного размера дефекта, приводится к виду:

$$\int_{-1}^1 \frac{\Phi(t)}{(t-x_1)^3} dt = \frac{\pi}{2} \left(\frac{a}{l}\right)^2 F_c.$$

Учитывая свойства функции раскрытия, получим гиперсингулярное интегральное уравнение с постоянной правой частью

$$\int_{-1}^1 \frac{\Phi'(t)}{(t-x_1)^2} dt = -\frac{\pi a^2}{L_3} F_c, \quad (34)$$

которое имеет решение [29] в классе гладких функций вида:

$$\Phi'(t) = \frac{a^2}{L_3} F_c \sqrt{1-t^2},$$

откуда

$$\Phi(t) = \frac{a^2}{L_3} F_c \int_{-1}^t \sqrt{1-s^2} ds = \frac{a^2}{L_3} F_c \frac{t\sqrt{1-t^2}}{2}. \quad (35)$$

II)  $\kappa^2 \gg 1$ , т.е.  $l \ll \left(\frac{2}{a^2} + \frac{k^2}{2}\right)^{-1/2}$ , тогда в ГИУ (33) можно пренебречь первым интегральным слагаемым и перейти к рассмотрению ГИУ вида:

$$\frac{1}{\pi} \left(1 - \frac{l^2 k^2}{2}\right) \int_{-1}^1 \frac{\Phi(t)}{t-x_1} dt = -F_n, \quad x_1 \in [-1, 1], \quad (36)$$

с учетом  $\Phi(t) = \chi'(t)$ , имеем

$$\frac{1}{\pi} \left( 1 - \frac{l^2 k^2}{2} \right) \int_{-1}^1 \frac{X(t)}{(t-x_1)^2} dt = -F_n, \quad x_1 \in [-1, 1].$$

Последнее интегральное уравнение имеет аналитическое решение вида:

$$X(t) = \frac{F_c}{1 - l^2 k^2 / 2} \sqrt{1-t^2}. \quad (37)$$

III)  $\kappa^2 \approx 1$ , т.е.  $l \approx 1 / \left( \frac{2}{a^2} + \frac{k^2}{2} \right)$ . В ГИУ (33) остаются оба интегральных слагаемых, для его исследования можно рассмотреть схему, описанную выше с использованием аппроксимирующих полиномов Чебышева, либо попытаться выписать полую выражение для расчета функции раскрытия [12]. Для этого обозначим интеграл Коши через  $H[\Phi](x) = \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{\Phi(t)}{t-x_1} dt$  и перейдем от ГИУ (33) к рассмотрению интегродифференциального уравнения:

$$\begin{aligned} H'' - \kappa^2 H &= F, \quad x_1 \in [-1, 1], \\ F &= \left( \frac{a}{l} \right)^2 F_c. \end{aligned} \quad (38)$$

Решение неоднородного дифференциального уравнения второго рода с постоянными коэффициентами (38) построим из решения однородного уравнения путем вариации произвольных постоянных, в результате получим интегральное уравнение вида:

$$H = \frac{F}{2\kappa^2} (-2 + e^{\kappa(x-1)} + e^{-\kappa(x+1)}) + A_1 e^{\kappa x} + A_2 e^{-\kappa x}. \quad (39)$$

С учетом ранее записанных свойств функции  $\Phi(x)$ ,  $x \in [-1, 1]$ , решение сингулярного интегрального уравнения можно рассчитать как:

$$\begin{aligned} \Phi(x) &= \frac{\sqrt{1-x^2}}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{f(t)}{\sqrt{1-t^2}(t-x)} dt; \\ f(t) &= \frac{F}{2\kappa^2} (-2 + e^{\kappa(t-1)} + e^{-\kappa(t+1)}) + A_1 e^{\kappa t} + A_2 e^{-\kappa t}; \\ A_1, A_2 &: \int_{-1}^1 \frac{f(t)}{\sqrt{1-t^2}} dt = 0, \quad \int_{-1}^1 \frac{t f(t)}{\sqrt{1-t^2}} dt = 0. \end{aligned}$$

Был проведен численный эксперимент при  $h = 1$ . На рис. 4 приведены графики, условно разделяющие плоскость характерных параметров асимптотического метода  $a$ ,  $l$  при разных значениях волнового числа  $k$  (одна, две и три бегущие волны, статический случай) на зоны случаев: I (область, расположенная ниже графиков), II (область, расположенная выше графиков) и зона случая III ( $\varepsilon$  — окрестность графиков,  $\varepsilon$  определяется задаваемой точностью расчетов, например  $\varepsilon = 10^{-3}$ ). На рис. 5 приведены графики относительной погрешности расчета функции раскрытия по асимптотическому методу (35), случай I. Как показывают результаты, погрешность расчета составляет не более 5 % при фиксированном  $l = 0,05$ , при этом диапазон изменения полудлины трещины составляет  $0 < a \leq 0,03h$ , что соответствует зоне действия случая I. Как показывают результаты расчетов, асимптотический метод позволяет существенно упростить и ускорить решение ГИУ, а также получить полуаналитические выражения для расчета функции раскрытия.

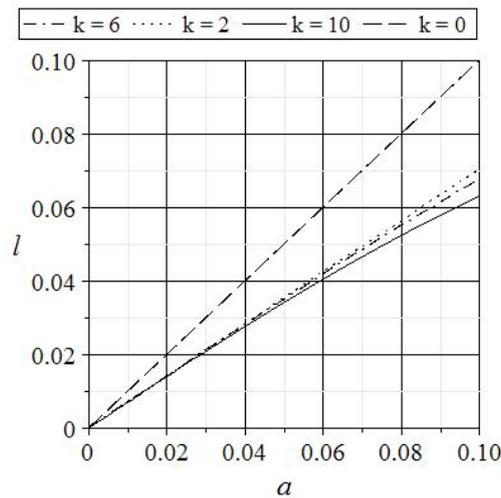


Рис. 4. Графики, определяющие зоны: I (выше графиков), II ( $\varepsilon$  — окрестность графиков), III (ниже графиков) асимптотического подхода для разных значений волнового числа  $k$ .

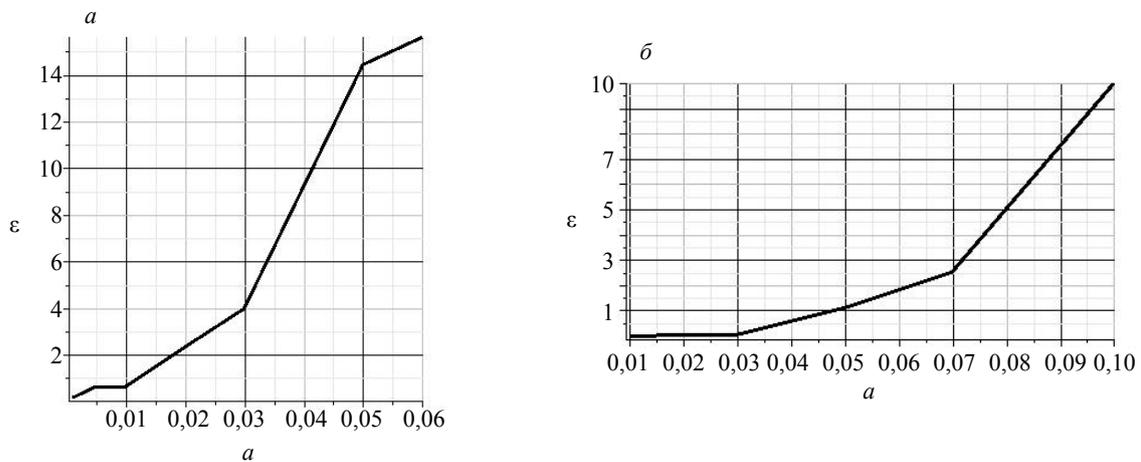


Рис. 5. Вещественная часть (мнимая имеет аналогичных характер) относительной погрешности вычисления функции раскрытия трещины при асимптотическом подходе для различных значений полудлины трещины  $a$ :  $k = 6$ ;  $l = 0,05$  (а);  $l = 0,1$  (б);  $\varepsilon = \max_{i=1..M} |\chi_i - \chi_i^{as}| / \chi_i \cdot 100\%$ .

## ВЫВОДЫ

Проведено масштабное исследование актуальной задачи о колебаниях слоя с расслоением на базе градиентной теории упругости. Получено граничное интегральное уравнение относительно градиента функции раскрытия трещины, проведен анализ ГИУ, численное исследование ГИУ на базе метода коллокаций, метода аппроксимации полиномами Чебышева. Осуществлен асимптотический анализ задачи, определены диапазоны изменения входных параметров задачи в случае трещин малой относительной длины, которые условно определяют три зоны. В рамках каждой из этих зон получено полуаналитическое решение исследуемой задачи. Проведен численный анализ задачи с позиции градиентной и классической линейной теории упругости. Определены диапазоны эффективности асимптотического подхода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Toupin R.* Elastic materials with couple-stresses // Arch. Rat. Mech. Anal. 1962. V. 11. P. 385—414.
2. *Toupin R.* Theories of elasticity with couple-stress // Arch. Rat. Mech. Anal. 1964. V. 17. P. 85—112.

3. Mindlin R.D. Micro-structure in linear elasticity // Arch. Rational Mech. Anal. 1964. V. 16. P. 51—78.
4. Лурье М.В. Задачи Ламе в градиентной теории упругости // Докл. АН СССР. 1968. Т. 181. № 5. С. 1087—1089.
5. Altan S.B., Aifantis E.C. On the structure of the mode-III crack-tip in gradient elasticity // Scripta Met. 1992. V. 26. P. 319—324.
6. Aifantis E.C. Gradient effects at the macro, micro and nano scales // J. Mech. Behav. Mater. 1994. V. 5 (3). P. 335—353.
7. Exadaktylos G., Vardoulakis I., Aifantis E. Cracks in Gradient Elastic Bodies With Surface Energy // Int. J. Fract. 1996. V. 79 (2). P. 107—119.
8. Vardoulakis I., Exadaktylos G., Aifantis E.C. Gradient Elasticity With Surface Energy: Mode-III Crack Problem // Int. J. Solids Struct. 1994. P. 4531—4559.
9. Erdogan F., Gupta G. D. On the Numerical Solution of Singular Integral Equations // Q. Appl. Math. 1972. V. 30. P. 525—534.
10. Chulkov A.O., Vavilov V.P., Moskovchenko A.I. Active thermal testing of delaminations in heat-shielding structures // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 3. P. 240—247.
11. Zhang L., Huang Y., Chen J. Y., Hwang K. C. The Mode III Full-Field Solution in Elastic Materials With Strain Gradient Effects // Int. J. Fract. 1998. V. 92 (4). P. 325—348.
12. Fannjiang A.C., Chan Y.-S., Paulino G.H. Strain Gradient Elasticity for Antiplane Shear Cracks: A Hypersingular Integrodifferential Equation Approach // Society for Industrial and Applied Mathematics. 2006. V. 62 (3). P. 1066—1091.
13. Paulino G.H., Fannjiang A.C., Chan Y.-S. Gradient Elasticity Theory for Mode III Fracture in functionally Graded Materials—Part I: Crack Perpendicular to the Material Gradation // Journal of Applied Mechanics. 2003. V. 70. P. 531—542.
14. Chan Y.-S., Paulino G.H., Fannjiang A.C., Chan Y.-S. Change of Constitutive Relations due to Interaction Between Strain-Gradient Effect and Material Gradation // Journal of Applied Mechanics. 2006. V. 73. P. 871—875.
15. Antipov A.G., Markov A.A. Detectability of rail defects by magnetic flux leakage method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 4. P. 277—285.
16. Ru C.Q., Aifantis E.C. A simple approach to solve boundary-value problems in gradient elasticity // Acta Mechanica. 1993. V. 101. P. 59—68.
17. Васильев В.В., Лурье С.А. Обобщенная теория упругости // МТТ. 2015. № 4. С. 16—27.
18. Васильев В.В., Лурье С.А. Нелокальные решения сингулярных задач математической физики и механики // ПММ. 2018. Т. 82. № 4. С. 459—471.
19. Askes H., Aifantis K. Gradient elasticity in static and dynamics: An overview of formulations, length scale identification procedures, finite element implementations and new results // International Journal of Solids and Structures. 2011. V. 48. P. 1962—1990.
20. Aifantis K., Askes H. Gradient elasticity with interfaces as surfaces of discontinuity for the strain gradient // J. Mech. Behav. Mater. 2007. V. 18. P. 283—306.
21. Ватульян А.О., Явруян О.В. Асимптотический подход в задачах идентификации трещин // ПММ. 2006. № 4. С. 714—724.
22. Ватульян А.О., Явруян О.В. Исследование обратных задач теории трещин с использованием асимптотического метода // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2018. Т. 15. № 2. С. 39—46.
23. Vatul'yan A.O., Yavruyan O.V. An Asymptotic Method for Solving the Problem of Identifying a Curvilinear Crack in an Elastic Layer // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 10. P. 810—819.
24. Ватульян А.О., Беляк О.А. К реконструкции малых полостей в упругом слое // Дефектоскопия. 2006. № 10. С. 33—39.
25. Yavruyan O.V., Yavruyan Kh. S. Asymptotic approach to the problem identification of a fringedelamination from the base // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020.
26. Ворovich И.И., Бабешко В.В. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. М.: Наука, 1989. С. 320.
27. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов сумм, рядов и произведений. М.: Физматгиз, 1962. 1108 с.
28. Белоцерковский С.М., Лифанов И.К. Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях и их применение в аэродинамике, теории упругости, электродинамике. М.: Наука, 1985. 253 с.
29. Iovane G., Lifanov I.K., Sumbatyan M.A. On direct numerical treatment of hypersingular integral equations arising in mechanics and acoustics // Acta Mechanica. 2003. № 162. P. 99—110.

## МЕТОД ОБРАБОТКИ АКУСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ КЛАПАНОВ ГАЗООЧИСТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

© 2021 г. А.С. Мартюгов<sup>1,\*</sup>, Е.В. Ершов<sup>1</sup>, И.А. Варфоломеев<sup>1</sup>, Д.В. Богачев<sup>1</sup>,  
Л.Н. Виноградова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Череповецкий государственный университет, Россия 162600 Вологодская область,  
г. Череповец, пр. Луначарского, 5  
E-mail: \*martyugov@bk.ru

Поступила в редакцию 25.06.2021; после доработки 29.07.2021  
Принята к публикации 18.08.2021

Предложен способ реализации акустического контроля состояния клапанов газоочистного оборудования с применением пошаговой модели распознавания акустических событий. Кроме того, определены основные признаки типовых сбоя в работе клапанов и разработана система их распознавания. Использование разработанной модели позволяет купировать 15 % отказов оборудования при 5,1 % случаев ложноположительных прогнозов.

*Ключевые слова:* метод, контроль, прогнозирование, акустический сигнал, клапан, газоочистка, производство стали.

DOI: 10.31857/S013030822110002X

### ВВЕДЕНИЕ

Европейские страны являются крупнейшим экспортным рынком для российских сталелитейных компаний. Эта отрасль приносит существенную экспортную выручку. Экспорт черных металлов составляет порядка 5,2 % от совокупного объема экспорта из России. Он уступает по значимости только нефти 28 %, нефтепродуктам 17,4 % и природному газу 12,6 % [1].

Важной особенностью современного европейского рынка являются повышенные экологические требования, предъявляемые к предприятиям экспортерам продукции черной металлургии. Нарушение этих требований может привести к значительным экономическим последствиям, вплоть до полной блокировки экспорта. В этих условиях особые требования предъявляются к функционированию газоочистных сооружений.

Одним из ключевых узлов, обеспечивающим работоспособность газоочистных сооружений, являются клапаны, они могут иметь различную конструкцию и применяются для продувки оборудования, сброса излишнего давления, технического обслуживания оборудования. Поломка клапана является основной причиной выхода оборудования из строя.

Клапан играет важнейшую роль в работе газоочистного оборудования, так как его задача контролировать температуру в печи, а значит от клапана зависит и вся работа в целом (рис. 1). Отсутствие клапана, его несвоевременное срабатывание или поломка может привести к повышению температуры, которое может стать причиной поломки дорогостоящего оборудования или даже пожара.

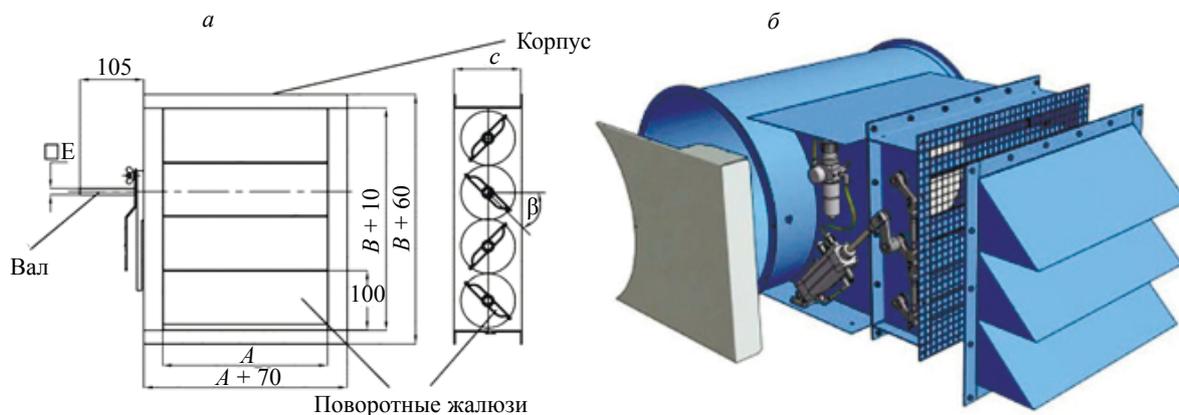


Рис. 1. Клапан газоочистного оборудования: описание основных частей (а); общий вид (б).

Для эффективной работы системы необходимо проводить регулярную ревизию оборудования, а также осуществлять мониторинг его текущего состояния. Ревизия состояния оборудования проводится в соответствии с правилами эксплуатации оборудования, а также принятым на предприятии регламентом. Мониторинг, как правило, осуществляется обслуживающим персоналом и носит периодический характер.

В тоже время не менее необходимым является постоянный мониторинг состояния оборудования. Решение этой проблемы силами специалистов — сложно осуществимая задача. Контролировать состояние оборудования необходимо круглосуточно в течении всего периода эксплуатации, не зависимо от занятости специалистов или режима работы оборудования [15]. Второй проблемой является отсутствие прямого доступа к отдельным узлам, что делает органолептический мониторинг вовсе невозможным.

Приведенные выше проблемы заставляют искать иные пути для организации процедуры мониторинга оборудования. Одним из часто применяемых решений является применение вибродиагностики [2]. Этот метод позволяет отслеживать состояние оборудования в режиме 24 на 7 и обеспечивает необходимую точность показаний [3]. Однако применение методов вибродиагностики сопряжено с рядом проблем, а именно: сложность монтажа оборудования ввиду особых требований к способу крепления датчика вибрации, невозможность установки систем вибродиагностики без остановки оборудования, высокая стоимость предлагаемых на рынке систем мониторинга. Кроме того, однажды смонтированную систему вибродиагностики невозможно применять на других аналогичных агрегатах, отсутствуют приемлемые портативные варианты [4].

Альтернативой повсеместно применяемым методам вибродиагностики может стать метод акустического контроля [5]. Акустический контроль нашел широкое применение в самых разных областях [6, 7]. Такой подход отличает невысокая стоимость сопутствующего оборудования, сравнительная простота монтажа, возможность использования портативных решений [13, 14]. Еще один плюс таких систем — отсутствие необходимости остановки оборудования для монтажа системы, микрофон не обязательно устанавливать непосредственно на диагностируемый агрегат [16]. Для непрерывного производства этот фактор является крайне важным.

По этой причине разработка метода и алгоритмов обработки акустической информации для диагностики состояния клапанов газоочистного оборудования является актуальной научно-технической задачей.

## ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Предлагаемый к рассмотрению метод контроля состояния оборудования основан на различиях акустических сигнатур клапанов газоочистного оборудования в нормальном и аварийном режиме.

Принцип действия воздушного клапана основан на разбавлении горячего газопылевого потока атмосферным воздухом, которое происходит за счет инжектирования при открытии данного клапана. Размер клапана зависит от того, до какой температуры должен быть разбавлен поток горячего воздуха, а скорость его срабатывания 1-2 с.

Клапан имеет жалюзи (см. рис. 1) с общим приводом от пневматического цилиндра. Акустические сигнатуры работы жалюзи являются основными исходными данными для осуществления диагностики.

В основе метода диагностики лежит поэтапная обработка акустической информации, состоящая из следующих этапов.

1. Сбор сигнала и его буферизация.
2. Предобработка — удаление шумов.
3. Извлечение признаков.
4. Классификация на основе алгоритмов машинного обучения.

Первый этап — сбор сигнала и его буферизация. Сбор аудиосигнала осуществляется при помощи портативного микрофона, буферизация происходит путем сохранения записанных аудиофайлов на внешний носитель.

Второй этап — удаление шумов. Этот этап включает в себя pre-emphasis фильтрацию и оконное взвешивание [4]. Pre-emphasis обработка осуществляется за счет применения КИХ-фильтра [8]. Это необходимо для спектрального сглаживания сигнала. В результате усиливаются более слабые и более высокие частоты сигнала, что позволяет сделать сигнал менее восприимчивым к шумам различной природы.

Оконное взвешивание необходимо применять в связи с тем, что сигнал разбивается на ограниченные во времени участки, поэтому при переходе в частотную область будет происходить эффект

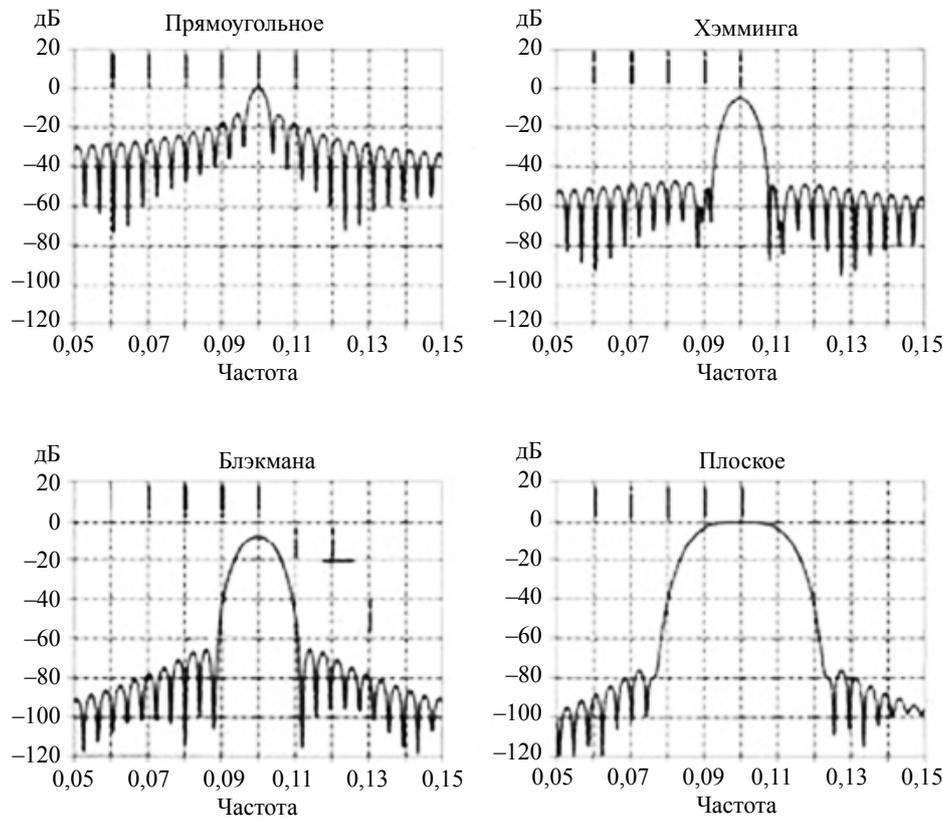


Рис. 2. Спектральные характеристики некоторых взвешенных функций [17].

просачивания спектра боковых лепестков, связанный с формой спектра функции прямоугольного окна (он имеет вид  $\sin(x)/x$ ). Поэтому, чтобы уменьшить влияние этого эффекта применяется взвешивание исходного сигнала различными видами окон, с формой, отличной от прямоугольной. Отсчеты входной последовательности умножаются на соответствующую функцию окна, что влечет за собой обнуление значений сигнала на краях выборки. В качестве взвешенных функций чаще всего выступают окна Хэмминга, Блэкмана, прямоугольное или плоское [7]. В предлагаемой модели применяется окно Хэмминга. Спектральные характеристики некоторых приведены ниже (рис. 2).

Третий этап извлечение признаков — выделение наиболее информативных параметров звукового сигнала [4]. В качестве примера приведены осциллограммы аудиофайлов с примерами корректной работы и с зафиксированным сбоем (рис. 3, 4).

Для каждой звуковой дорожки вычисляется набор мел-частотных кепстральных коэффициентов (MFCC, от англ. mel-frequency cepstral coefficients) [9]. Суть метода мел-частотных кепстральных коэффициентов заключается в том, чтобы, используя шкалу перевода частоты сигнала в его высоту в мелах вычислить многомерные векторы признаков, с которыми в дальнейшем будут работать алгоритмы классификации.

Высота звука, воспринимаемого человеческим слухом, не связана линейно с его частотой, поэтому для ее анализа была создана количественная оценка звука — мел, единица измерения высоты воспринимаемого звука, основанная на психофизических параметрах восприятия. Мел удобно применять в целях анализа звука, так как его использование «приближает» алгоритмы обработки данных к человеческим параметрам восприятия, что благотворно сказывается на качестве распознавания и облегчает составление обучающих выборок [9]. На рис. 5 изображен график зависимости мел-шкалы от частоты колебаний звукового сигнала.

Зависимость высоты воспринимаемого звукового сигнала от его частоты описывается как

$$m = 2595 \log_{10} \left( 1 + \frac{f}{700} \right) = \ln \left( 1 + \frac{f}{700} \right), \quad (1)$$

где  $m$  — высота звука в мелах;  $f$  — частота в герцах.

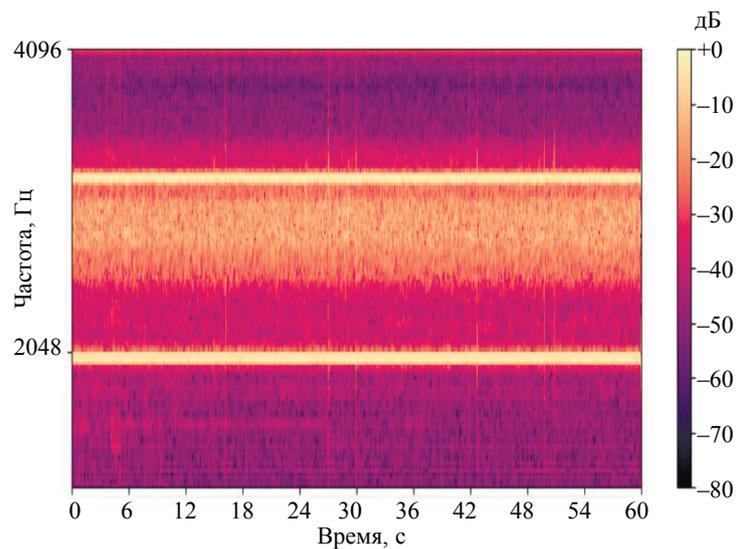


Рис. 3. Спектрограмма корректной работы клапана газоочистного оборудования.

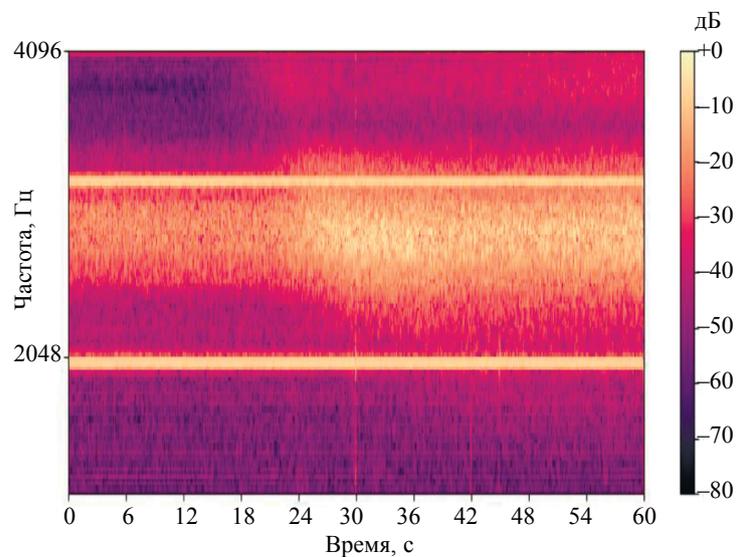


Рис. 4. Спектрограмма сбоя в работе клапана газоочистного оборудования.

В ходе вычисления MFCC используется машинное вычисление преобразования Фурье, при таком вычислении возникают сложности, связанные с необходимостью суммировать бесконечный ряд чисел. Поэтому в реальных вычислениях было использовано дискретное и быстрое, которое является оптимизированной версией дискретного. Его вычисляют по формуле:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi n}{N} kn}, k = 0, N-1, \quad (2)$$

где  $N$  — размерность дискретного отрезка сигнала;  $X_k$  — амплитуда синусоидальных сигналов, которые составляют основной сигнал.

При анализе полученных данных недостаточно сделать выводы об их информативности только лишь по спектру сигнала. В таких случаях применяется Кепстр или другими словами спектр спектра исходного сигнала. Он используется, когда на спектрограмме не заметны скрытые, но существенные для анализа периодичности в сигнале.

Суть вычисления Кепстра в том, чтобы представить уже имеющийся спектр не как распределение некоторой величины исходных данных, а как самостоятельный сигнал.

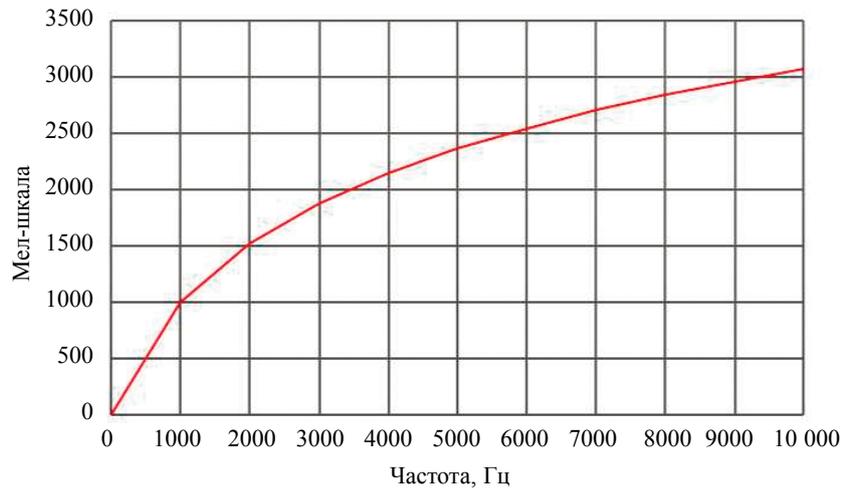


Рис. 5. График зависимости высоты звука в мелах от частоты колебаний [18].

Для вычисления мел-частотных кепстральных коэффициентов входящий сигнал сначала разбивается на кадры (фреймы) таким образом, чтобы они перекрывали следующие и предыдущие за ними. Длина фреймов непосредственно влияет на работу алгоритма: при увеличении длины отрезков повышается точность, но падает скорость работы алгоритма. В основном принимаются значения в диапазоне от 20 до 40 миллисекунд [10, 11].

Затем для каждого фрейма вычисляется его спектр с помощью дискретного преобразования Фурье. Полученные спектральные коэффициенты фреймов накладываются на мел-частотные окна. Данные окна сосредотачиваются ближе к низким частотам, т.к. это наиболее близко к механизму восприятия высоты звука: чем ниже частота, тем меньше отличаются соседние частоты. Это видно на рис. 6.

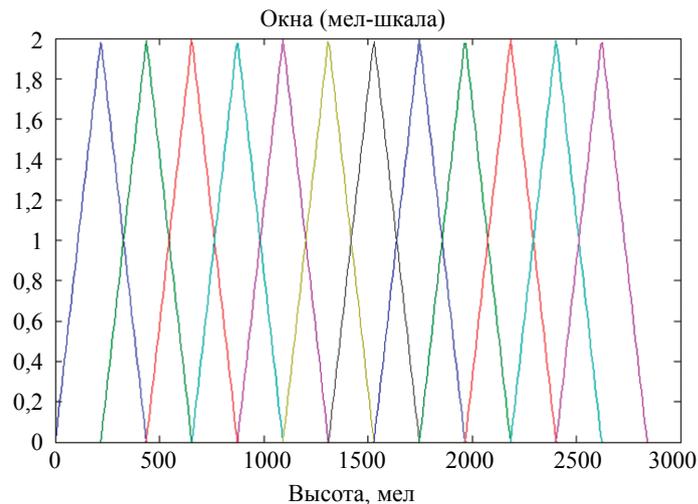


Рис. 6. Пример наложения окон на мел-шкалу.

Постобработка признаков сводится к применению дискретного косинусного преобразования, которое дает на выходе многомерный вектор признаков сигнала.

Полученные в результате этого преобразования величины — мел-частотные кепстральные коэффициенты.

Для обучения и тестирования полученной модели были сформированы несколько выборок. Каждая выборка формируется на основе набора из 950—1000 аудиозаписей. Каждая такая запись преобразуется в набор MFCC и подается на вход классификатора.

Обучающие выборки содержат примеры корректной работы оборудования. Контрольные выборки состоят из аудиозаписей, содержащих примеры корректной работы и примеры сбоев. Доля аудиозаписей некорректной работы в контрольных выборках достигает 30 %. Целевая переменная — наличие сбоя в работе клапана.

Четвертый этап — классификация. На этом этапе используются алгоритмы машинного обучения для решения задачи бинарной классификации. В качестве обучающей выборки были использованы данные описанные выше. При выборе алгоритма машинного обучения было проведено сравнение трех алгоритмов, которые могут быть применены для бинарной классификации: метод опорных векторов (от англ. Support vector machine, SVM), Random forest, логистическая регрессия (logit model). Сравнение предложенных алгоритмов на полученном наборе данных представлено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение алгоритмов машинного обучения

Метод	Точность	Полнота	F-мера
SVM	1	0,95	0,97
Random forest	0,86	0,95	0,90
Logit model	0,60	0,74	0,66

Приведенные значения показывают, что для предложенной предметной области наиболее перспективным методом является SVM.

Метод опорных векторов — бинарный классификатор, который строит в пространстве признаков разделяющую функцию, задающую гиперплоскость [12]:

$$f(x) = wx + b. \quad (3)$$

Пусть задана последовательность точек пространства признаков  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  с метками  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$   $y_i \in \{-1, 1\}$   $1 \leq i \leq n$ , соответствующими двум классам.

В случае линейной разделимости данных условия для нахождения функции записываются как

$$\begin{cases} w * x_i + b \geq 1, & y_i = 1 \\ w * x_i + b \leq -1, & y_i = -1 \end{cases} \quad (4)$$

Для надежного разделения классов необходимо, чтобы расстояние между разделяющими гиперплоскостями было как можно большим. Расстояние вычисляется как  $\frac{2}{\|w\|}$ , следовательно, задачу поиска разделяющей гиперплоскости можно свести к минимизации  $\|w\|^2$ .

В случае линейно-неразделимых множеств вводится функция ядра. Основная идея заключается в том, чтобы отобразить исходное пространство в пространство более высокой размерности, в котором множества уже могут быть разделимы линейно. При этом в силу того, что всюду в алгоритме признаки используются не отдельно, а в виде скалярных произведений, нет необходимости строить данное преобразование в явном виде.

Достаточно задать функцию ядра, определяющую скалярное произведение в новом пространстве:

$$K(x_i, x_j) = \varphi(x_i)\varphi(x_j). \quad (5)$$

В качестве сохраняемой модели в методе опорных векторов выступают параметры разделяющей функции  $f(x)$ , а также параметры функции ядра. Параметры ядра обычно определяют путем перебора некоторого множества значений и оценкой методом кроссвалидации. После того, как решающая функция  $f(x)$  вычислена, принадлежность вектора соответствующему классу определяется знаком выражения  $f(x')$ .

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Практическая реализация предложенной модели осуществлялась средствами языка Python. Использование Python обусловлено наличием широкого спектра математических пакетов, а также относительной простотой реализации программ на этом языке, что позволяет ускорить создание прототипов и проверку предложенных решений.

Аппаратная реализация системы акустической диагностики представляет собой микрокомпьютер Raspberry Pi с подключенным к нему микрофоном (рис. 7). Для целей буферизации используется внешний носитель, расширяющий возможности микрокомпьютера по хранению данных.

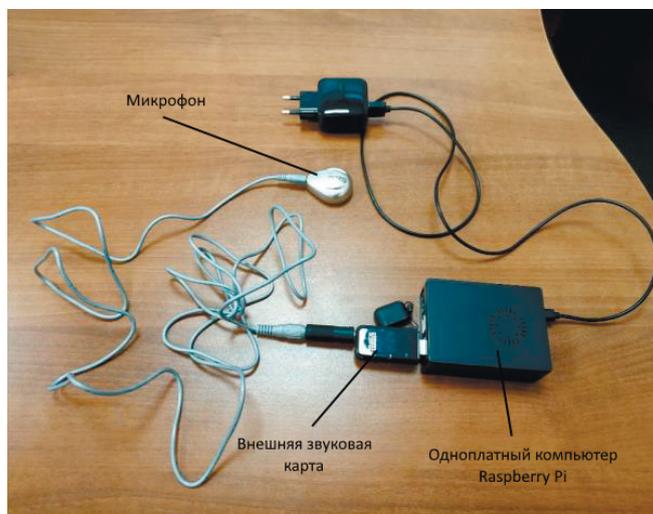


Рис. 7. Прототип устройства акустического контроля.

Установка компактно размещается в непосредственной близости от контролируемого оборудования и передает информацию о сбоях на компьютер оператора с предустановленным ПО «Прогнозирование отказов» (рис. 8), которая в удобном для оператора виде отображает информацию о текущем состоянии оборудования.

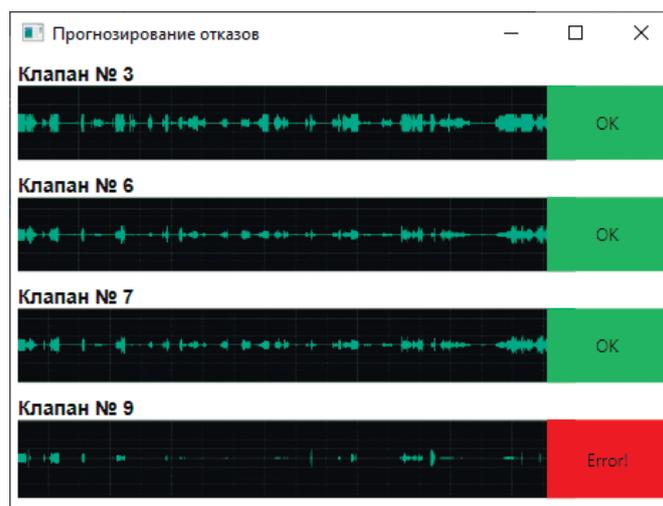


Рис. 8. Интерфейс программы прогнозирования отказов.

Созданный прототип прошел испытания на промышленной установке газоочистки. В течении года промышленной эксплуатации удалось предупредить 4 факта отказа оборудования из 26, что позволяет говорить о купировании 15 % отказов клапанов. Пороговые значения модели были подобраны таким образом, чтобы снизить количество ложноположительных прогнозов модели. Полученное значение ложноположительных прогнозов при обучении модели составило 5,1 %. При этом во время испытаний ложноположительных прогнозов не было выявлено. Таким образом предложенный метод показывает лучшую эффективность, чем ранее применяемый на данном оборудовании метод вибродиагностики, который позволяет купировать до 13,5 % отказов. Кроме того, аппаратная составляющая проекта значительно дешевле и проще в монтаже применяемого ранее оборудования.

Дальнейшее усовершенствование модели ведется в направлении улучшения алгоритмов классификации для распознавания типа произошедшего сбоя, а также разработки собственной аппаратной платформы, в качестве замены Raspberry Pi для удешевления установки.

## ВЫВОДЫ

В результате проделанной работы была построена модель для контроля и прогнозирования состояния клапанов газоочистного оборудования. Применение предложенного подхода позволит сократить текущие затраты на содержание оборудования за счет уменьшения числа простоев путем постоянного мониторинга его текущего состояния с целью прогнозирования возможных поломок.

Разработанная модель прогнозирования позволяет купировать 15 % сбоев в работе оборудования, при этом исключив ложноположительные срабатывания, которые приводят к дополнительным расходам на обслуживание.

В качестве перспективы предложенного подхода предлагается дальнейшее совершенствование алгоритмов классификации с целью распознавания не только аварийного режима работы, но и различных типов отказов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Салин В.Н., Нарбут В.В., Шпаковская Е.П. Конъюнктура мирового рынка стали: экономико-статистический анализ // Проблемы экономики и юридической практики. 2020. Т. 16. № 1. С. 72—81.
2. Кошеков К.Т., Кликушин Ю.Н., Кашиевкин А.А., Латыпов С.И., Софьина Н.Н., Савостина Г.В., Кошеков А.К. Интеллектуальная система вибродиагностики нефтегазового оборудования // Дефектоскопия. 2018. № 4. С. 31—41.
3. Кошеков К.Т., Кликушин Ю.Н., Кобенко В.Ю., Софьина Н.Н., Савостин А.А., Кашиевкин А.А. Диагностика насосного агрегата на основе идентификационных измерений вибросигналов // Дефектоскопия. 2016. № 5. С. 36—43.
4. Костюков А.В., Щелканов А.В., Бурда Е.А. Комплексная автоматизированная диагностика динамического оборудования / Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: материалы 7-й международной научно-технической конференции. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. С. 181—182.
5. Кривошеев И.А., Шамурина А.И. Контроль образовавшихся несплошностей в образце твердого тела акустическим // Дефектоскопия. 2017. № 8. С. 29—34.
6. Францев Э.Ф. Дефектоскопия корпусов судов из композиционных материалов, находящихся в эксплуатации, акустическими методами неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 2013. № 1. С. 3—11.
7. Антонов Е.Н., Савенок О.В. Оценка качества цементирования и технического состояния скважин на примере Самотлорского месторождения по данным акустического метода контроля // Булатовские чтения. 2020. Т. 1. С. 36—48.
8. Абрамов Г.В., Коробова Л.А., Ивашин А.Л., Матыцина И.А. Анализ и использование математических методов для распознавания звуковых сигналов // Вестник ВГУИТ. 2015. № 2 (64).
9. Козлова Л.П., Козлова О.А. Особенности задач распознавания звука // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2020. Т. 1. С. 185—187.
10. Фотеску Н.К., Фешина Е.В. Распознавание звука и принцип работы мобильного приложения «Shazam» / Цифровизация и глобализация мировой науки и техники: новые исследовательские методы и подходы: Материалы V Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону: ООО Изд-во ВВМ, 2020. С. 59—63.
11. Комаров П.С., Квац А.И. Обработка голосовых сигналов при помощи мел-частотных кепстральных коэффициентов (MFCC) // Аспирант и соискатель. 2020. № 6 (120). С. 25—28.
12. Зенков В.В. Применение аппроксимации дискриминантной функции Андерсона и метода опорных векторов для решения некоторых задач классификации // Автоматика и телемеханика. 2020. № 1. С. 147—160.

13. Мишакин В.В., Гончар А.В., Ключников В.А., Курашкин К.В., Фомин А.Е., Сергеева О.А. Контроль состояния циклически деформируемых нержавеющей сталей акустическим и вихретоковым методами // Измерительная техника. 2021. № 2. С. 62—67.

14. Ремшев Е.Ю., Соболев И.А., Олехвер А.И., Лукичев В.Ю. Разработка бортового комплекса неразрушающего контроля конструкции летательного аппарата методом акустической эмиссии // Noise Theory and Practice. 2021. Т. 7. № 2 (24). С. 65—82.

15. Злобин Д.В., Волкова Л.В., Богдан О.П., Земсков Т.И., Казанцев С.В. Универсальная экспериментальная установка для проведения акустических исследований // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 2. С. 28—36.

16. Пьянков В.А., Пьянков И.Н. Акустические методы контроля лопаток газотурбинных двигателей // Технология машиностроения. 2021. № 2. С. 34—48.

17. Микулович В.И. Цифровая обработка сигналов. Минск: Изд-во БГУ, 2011. 214 с.

18. Авдеев Л.В., Иванов П.Б. Математическая модель восприятия звукорядов. Дубна: Изд-во ОИЯИ, 1990. 18 с.

# ДИАГНОСТИКА ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ РОТОРОВ ДВУХКОНТУРНОГО ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФАЗОЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПОЛУЧЕННОЙ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ ВАЛА

© 2021 г. С.Л. Звонарев<sup>1,\*</sup>, А.И. Зубко<sup>1,2,\*\*</sup>, А.А. Зубко<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),  
Россия 125993 Москва, Волоколамское шоссе, 4

<sup>2</sup>ПАО «ОДК-УМПО» филиал «ОКБ им. А. Люльки», Россия 450039 Уфа, ул. Ферина, 2  
E-mail: \*zvonaREV2@yandex.ru; \*\*zBK2@yandex.ru; \*\*\*shkuratenko.anna@mail.ru

Поступила в редакцию: 08.07.2021; после доработки 02.09.2021

Принята к публикации 10.09.2021

Рассматриваются теоретические и практические подходы к построению фазочастотных характеристик двухконтурного турбореактивного двигателя (ТРДД) и приводятся результаты проведенных экспериментов. Новизна работы заключается в использовании фазы вибрации для диагностики технического состояния роторов ТРДД и исключение применения для построения фазочастотной характеристики роторов информации от датчика его начального положения. Для определения мгновенного значения фазы колебаний ротора используется метод орбитального анализа вибрации. Применение анализа изменения фазы колебаний позволяет определять наличие резонансных процессов, а также дефекты и неисправности, вызывающие изменения параметров жесткости и демпфирования ротора. Приводятся примеры диагностирования ТРДД с помощью анализа фазочастотных характеристик.

*Ключевые слова:* ротор ТРДД, дисбаланс, фазочастотная характеристика, жесткие и гибкие роторы, резонанс.

**DOI:** 10.31857/S0130308221100031

## ВВЕДЕНИЕ

Сложность конструкции газотурбинных двигателей (ГТД) в целом и роторных систем в частности [1], индивидуальные особенности изготовления и сборки каждого изделия, обеспечение требований безопасной эксплуатации в течение всего заложенного разработчиками ресурса [2] требует постоянного контроля изменения их технического состояния.

Е.Ю. Марчуков (г. Москва) и С.П. Аксенов (г. Воронеж) считают, что конструкция современного ГТД становится чрезвычайно чувствительной к малейшим погрешностям изготовления, сборки или ухудшения условий эксплуатации. Отмечается выраженная реакция (в виде появления неисправностей) к крайним случайным сочетаниям воздействующих на них внутренних и внешних неблагоприятных факторов. Причем речь идет об отклонениях в пределах допуска на настройку, изготовление или сборку [3].

Поэтому эффективность раннего обнаружения рискованных состояний, предшествующих отказам базовых элементов сложных систем, представляется фундаментальным критериальным параметром методологии диагностики технического состояния исследуемых объектов [4].

Повышение эффективности технических средств и методов мониторинга, диагностики и прогноза технического состояния является важным приоритетным направлением в области повышения безаварийной эксплуатации современных авиационных и наземных газотурбинных двигателей.

## ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГТД

Из-за стремления разработчиков к снижению массы, ГТД имеют минимальные требования по запасам прочности, и их эксплуатация требует постоянного проведения мониторинга технического состояния [5]. В таких условиях особое значение для определения технического состояния ГТД приобретает использование вибродиагностики [6]. С практической точки зрения наибольший интерес представляют исследования пространств диагностических признаков на фазовой плоскости, обеспечивающих достоверность и надежность прогноза технического состояния роторных систем ГТД [7, 8]. Как показали проведенные нами исследования, изменение фазы колебаний в ряде случаев обладает большей чувствительностью к развитию повреждений по сравнению с другими методами.

В структурном отношении ГТД отличается многоконтурностью энергетических связей между звеньями системы. Под воздействием внутренних и внешних факторов такая система приобретает нестабильность динамического поведения [9], а связи носят нелинейный характер, что порождает возникновение ее многочастотных колебаний с различной амплитудой [10, 11].

Отклонения при изготовлении и сборке ротора, ухудшение его технического состояния с увеличением наработки вызывает рост его вибрационной активности. Борьба с вибрацией является важной проблемой в современном двигателестроении [12]. На роторную систему всегда воздействует ансамбль нагрузок от внешних и внутренних сил, различающихся в источниках возбуждения колебаний. Их результирующий вектор, представляющий из себя обобщенное воздействие нескомпенсированных сил, постоянно изменяющихся по величине и направлению в пространстве, вызывающий колебания системы, которые передаются от ротора через детали подшипников на статор, где возникает реакция — вибрация корпуса двигателя.

Анализ параметров колебаний (амплитуды, частоты, фазы), характеризующих вибрационное состояние газотурбинного двигателя (ГТД), является широкодоступным, распространенным методом диагностирования элементов его роторной системы.

В частности, анализ изменения фазы колебаний ротора становится информативным в случаях, когда в силу определенных причин изменяются жесткость и демпфирование системы. Это может происходить при появлении дефектов, влияющих на податливость, изменение зазоров и люфтов в роторной и опорной системах. Поэтому знание мгновенного значения фазы или получение фазового портрета системы во многих случаях может оказаться очень полезным для определения ее технического состояния. Анализ амплитуды и фазы различных компонент широкополосного вибрационного сигнала позволяет установить многие дефекты, в том числе на этапе их зарождения [13].

Основные отклонения в работе роторных систем ГТД, которые могут быть обнаружены с помощью анализа изменения фазы их колебаний, это:

- близость частот вращения ротора к резонансным частотам элементов конструкции;
- трещины ротора;
- несоосность ротора и опоры или валов в валопроводе, перекося колец подшипников опор;
- изгиб (прогиб) ротора;
- ослабление затяжки стяжных болтов ротора;
- дисбаланс ротора;
- усталостное выкрашивание подшипниковых опор роторов и др. [14].

Дефекты такого рода непосредственно влияют на работоспособность и долговечность двигателя в целом и должны быть исключены в эксплуатации. При проведении вибромониторинга с целью диагностирования в большинстве случаев очень сложно или невозможно определить отклонения от нормальной работы ротора без анализа фазы колебаний, так как амплитуда его вибрации не всегда увеличивается при появлении и развитии дефекта. Поэтому данный подход является *актуальным* для анализа технического состояния роторных систем ГТД.

Для диагностики любых механических систем используются два подхода к проведению измерения вибрации и определению ее фазы:

- абсолютные измерения*, когда датчики устанавливаются в непосредственной близости к ротору;
- относительные измерения*, когда датчики измеряют вибрацию элементов, находящихся в механической связи с ротором и воспринимающих его воздействие [15].

Абсолютные измерения фазы очень широко используются и описаны во многих источниках [16—18]. Такой подход используют многие российские и зарубежные фирмы. Например, в американском институте «American Petroleum Institute (API)» были подготовлены рекомендации, названные «Вибрации, осевое расположение, температура подшипника, системы мониторинга». Для мониторинга они предусматривают установку под углом  $90^\circ$  друг к другу двух вихретоковых проксиметров (бесконтактных датчиков линейного перемещения), постоянно измеряющих величину зазора между датчиком и ротором, а также датчика углового положения ротора, который нуждается в метке на роторе и отслеживает изменение ее смещения (угла фазы) при вращении ротора [17, 19].

Но использование анализа изменения фазы в зависимости от частоты вращения ротора или времени для диагностирования ГТД затрудняется особенностями их конструкции. При многороторной конструктивной схеме двигателя сложно, а порой практически невозможно установить любой датчик между вращающимися роторами, а если и удастся это сделать, то конструкция получается сложной и ненадежной.

В случае же, когда для использования определения углового положения вала применяется датчик, установленный на трансмиссии (например, датчик частоты вращения ротора), из-за погрешностей определения передаточного отношения зубчатых передач возникает отклонение в определении фазы колебаний. Ошибка, накапливаясь, существенно искажает получаемые результаты, что не позволяет выполнять диагностирование. При этом зачастую довольно сложно подобрать необходимое (точное) передаточное отношение зубчатых передач датчика и измеряемого ротора, что вовсе делает невозможным точное инструментальное определение его углового положения.

Из-за вышерассмотренных конструктивных особенностей в системах контроля функционирования двухконтурных ГТД используются только *относительные* измерения параметров вибрации. Это препятствует широкому распространению методов диагностики, связанных с определением фазы вибрации колебаний ротора. Несмотря на их информативность и диагностическую ценность, они в настоящее время не применяются в системах контроля функционирования и диагностики ГТД.

Поэтому ставится задача: с целью проведения диагностирования роторных систем ГТД определить мгновенное значение фазы радиальных колебаний ротора ГТД с использованием минимального количества датчиков, измеряющих относительную вибрацию.

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗЫ КОЛЕБАНИЙ РОТОРА

Как известно, при вращении ротора из-за несовпадения его центра масс и линии центров вращения происходят колебания, возбуждаемые дисбалансом ротора. В таком случае орбита носит круговой характер, но из-за анизотропии жесткости системы она приобретает вид эллипса. При этом измеряемые датчиками на корпусе колебания возбуждаются при взаимодействии самого «тяжелого» места ротора (определяемом направлением вектора дисбаланса) с подшипниковой опорой. Возникает колебательный процесс, имеющий свою амплитуду, частоту и фазу [20]. В идеальных случаях данный процесс является гармоническим и описывается формулой:

$$x(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $A_0$  — амплитуда колебаний;  $\omega_0$  — круговая частота вращения;  $t$  — время;  $\varphi_0$  — начальная фаза колебаний;  $(\omega_0 t + \varphi_0)$  — фаза колебаний.

Изменения его производной будут характеризоваться функцией:

$$x'(t) = dx(t)/dt = -A_0 \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (2)$$

Представление такого колебания на фазовой плоскости будет описываться уравнением эллипса [21—23] (см. рис. 1):

$$\left[ \frac{x(t)}{A_0} \right]^2 + \left[ \frac{x''(t)}{A_0 \omega_0} \right]^2 = 1. \quad (3)$$

Изменение амплитуды вибрации ГТД из-за большого количества воздействующих факторов, таких как: изменение параметров атмосферы, полета, режима работы двигателя внутреннего состояния роторной системы по причине вариаций температурных полей отдельных деталей, узлов и т.д., носит случайный, нелинейный характер и должно описываться случайными непрерывными

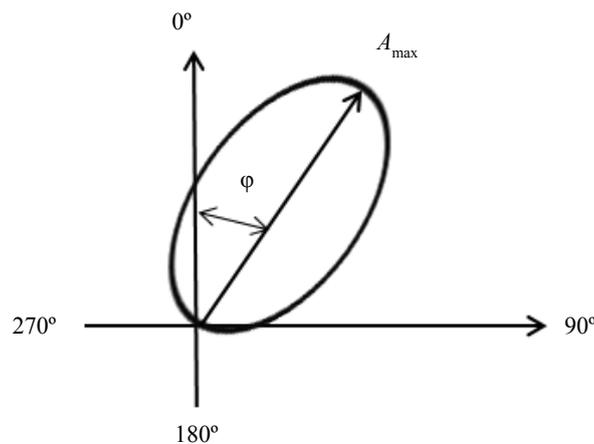


Рис. 1. График перемещения центра ротора в фазовой плоскости [21].

функциями. Поэтому одной из основных проблем является описание и извлечение информации из экспериментальных данных об изменении какой-либо физической величины [24, 25].

В.И. Хименко (г. Санкт-Петербург) считает, что представление непрерывных случайных процессов на фазовой плоскости является одним из эффективных методов представления информации. Структура фазовых траекторий отображает основные особенности поведения выборочной функции рассматриваемого процесса [22]. При этом анализ полученной фазовой траектории позволяет определить мгновенные значения фазы (см. рис. 2).

Задачи представления и исследования случайных процессов на фазовой плоскости приводят к рассмотрению разнообразных структур фазовых траекторий. Для их описания, сравнения и общего анализа, помимо качественных показателей необходимо иметь и количественные характеристики, отражающие особенности вероятностного поведения фазовых траекторий при различных моделях исследуемых процессов. В данном случае анализ функции изменения фазы колебаний ротора в зависимости от частоты его вращения является критериальной характеристикой рассматриваемого процесса.

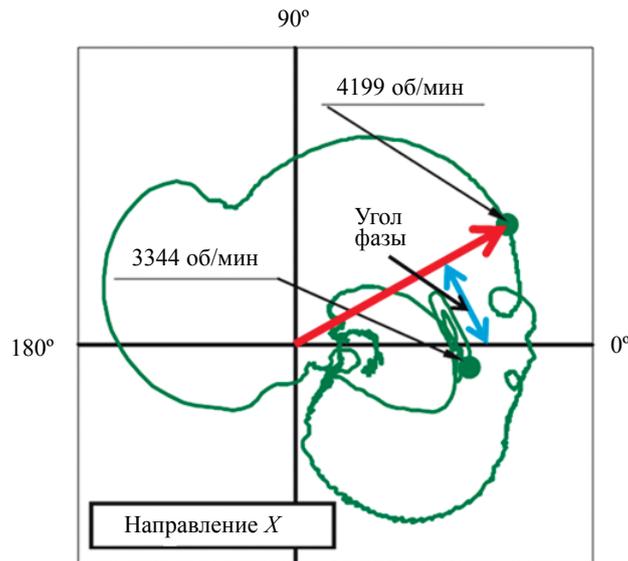


Рис. 2. Диаграмма Найквиста (снимок экрана). Изменение фазы колебаний ротора ВД выполнено проксиметром, в частотном диапазоне 2000—8000 об/мин. Датчик установлен в плоскости турбины. Параметром (точки на кривой) является частота вращения ротора, мин<sup>-1</sup>.

Такой подход использует компания Bently Nevada для диагностики однороторных стационарных агрегатов, позволяющих установить датчики относительного перемещения непосредственно у поверхности ротора [26]. Как метод представления информации чаще всего используется диаграмма Найквиста, построенная по результатам обработки сигналов, полученных от таких датчиков. Данная диаграмма построена в полярных координатах относительно опорного значения фазы (по сигналу с датчика углового положения ротора). На этой диаграмме (см. рис. 2) каждой частоте поставлен в соответствие вектор частотной составляющей (длина вектора — амплитуда, угол поворота вектора — фаза). Если параметром является частота вращения — концы векторов, соответствующих разным частотам вращения, соединяются линией.

Диаграмму Найквиста часто используют для определения частот вращения, на которых имеют место резонансы. Они могут быть локальные — захватывающие отдельные элементы или глобальные, в которых происходят колебания всей системы «ротор—подшипник—опора» [27]. В таком представлении, при прохождении частоты вращения через зону резонанса, траектория точки на диаграмме характеризующей мгновенное состояние системы описывает полный круг. Для системы с несколькими степенями свободы форма диаграммы Найквиста повторяется при прохождении каждого резонанса, но уже с другими параметрами, что вызвано различной реакцией системы при изменении частоты вращения ротора. Так как ротор ГТД представляет систему с малой степенью нелинейности — траектория диаграммы Найквиста имеет отклонения от правильной формы.

Из-за невозможности проведения абсолютных измерений вибрации ГТД нами предложен новый способ построения орбиты вибрации [28], при котором траектория перемещения строится путем использования сигналов двух ортогонально установленных датчиков вибрации, размещенных на корпусе двигателя и определяющих мгновенное положение конца вектора вибрации на фазовой плоскости. Полученная орбита вибрации всесторонне характеризует прецессию ротора [23, 29], а положение большого диаметра эллипса определяет фазу, а изменение его углового положения относительно осей координат является изменением угла фазы соответственно (рис. 3). Так как для проведения диагностирования необходима информация об изменении фазы, а не ее фактическое значение, за нулевую отметку принимается точка начала измерений и относительно нее ведется отсчет. При изменении частоты вращения ротора положение орбиты (и соответственно угла большого диаметра эллипса—фазы) может изменяться (рис. 3а, б).

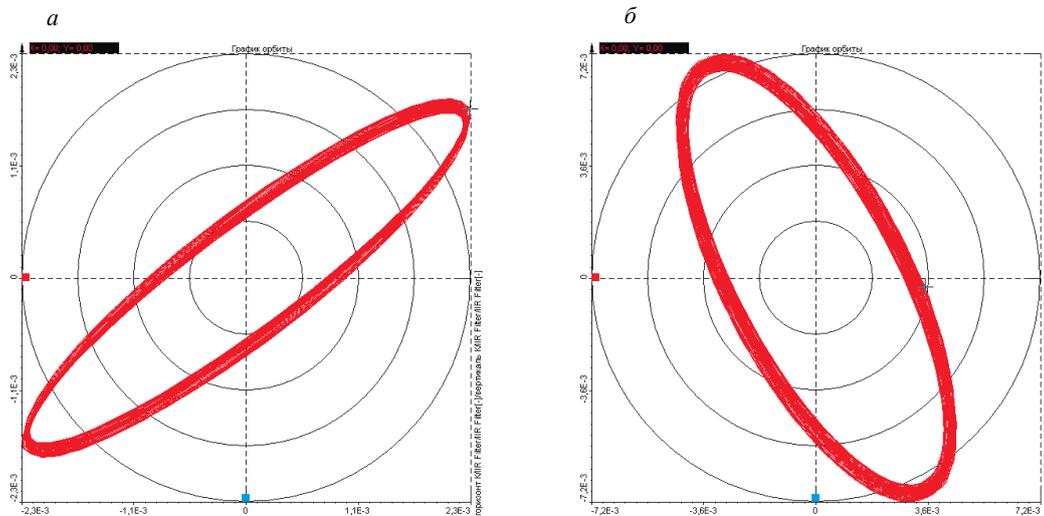


Рис. 3. Графики изменения орбит вибрации в сечении опоры компрессора высокого давления ротора в процессе работы ГТД.

Для идеального ротора при изменении его частоты вращения начальная фаза колебаний будет сохраняться на всех частотах вращения ротора.

Если в данную идеализированную систему внести некоторые инерционные силы, вызванные изменением относительного положения отдельных элементов ротора (демпфированием, сухим трением и т.д.), то с увеличением его частоты вращения ротора будет изменяться значение фазы колебаний [30].

С помощью предложенного метода определения фазы можно исследовать вопросы изменения динамических параметров и устойчивости колебательных процессов роторных систем в частности, что является существенным фактором для развития теоретических подходов к роторной динамике.

Чаще всего анализ изменения фазы вибрационных колебаний используется для балансировки роторов или определения возможного появления в одном из диапазонов рабочих частот вращения механической системы резонансных процессов, источником возбуждения которого является сам ротор. До наступления резонансной частоты вращения ротор будет вести себя аналогично вышеописанному идеальному случаю. При этом направление взаимодействия реального ротора со статором может плавно смещаться с увеличением частоты вращения.

В случае наличия резонанса с наступлением резонансной частоты вращения ротора его динамическое поведение будет изменяться. При совпадении частоты вращения с критической частотой амплитуда резко увеличится, а фаза интенсивно повернется до 180 град (справедливо для идеальной системы без демпфирования, сухого трения и т.д.). После прохождения резонанса фаза останется в этом положении или продолжит незначительное плавное смещение.

Измеряя и исследуя фазу вибрации, можно косвенным путем также определить смещение точки взаимодействия ротора со статором. Данные сведения позволяют проводить не только исследования динамических процессов роторных систем, но и являются диагностическим признаком повреждений элементов опор ротора. Анализ этих данных дополняют сведения полученные дру-

гими методами и оказывают существенное влияние на повышение качества инженерного анализа конструкции в целом.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗЫ КОЛЕБАНИЙ РОТОРА

Для верификации предложенного метода были проведены исследования экспериментального автономного ротора высокого давления (ВД) ТРДД, установленного на вакуумном разгонном стенде HL-4 (рис. 4).

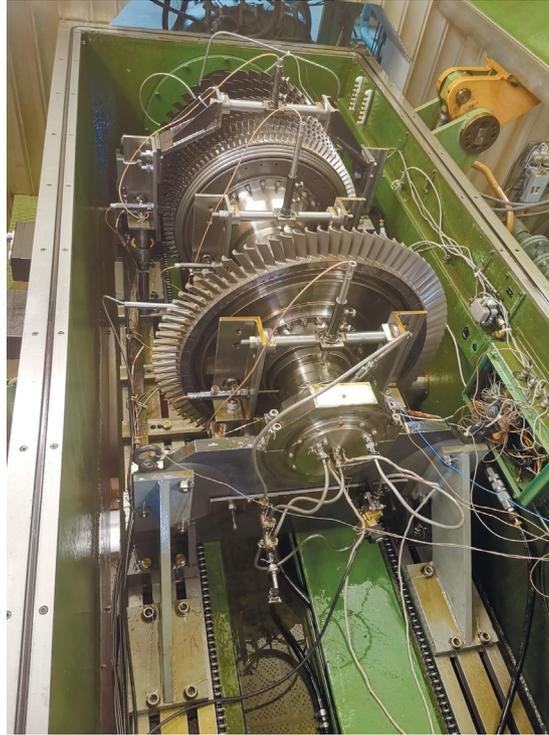


Рис. 4. Внешний вид ротора, установленного на разгонном вакуумном стенде.

В процессе испытаний выполнялось построение фазочастотной характеристики во всем рабочем диапазоне частот вращения ротора стандартным методом с использованием сигнала вертикально установленного проксиметра (датчика линейного перемещения) (рис. 5) и датчика положения ротора.



Рис. 5. Фазочастотная характеристика, построенная по сигналам датчика перемещения (проксиметра) и углового положения ротора.



Рис. 6. Фазочастотная характеристика, построенная с помощью орбитального анализа вибрации.

На рис. 6 приведена фазочастотная характеристика того же ротора, полученная с использованием орбитального анализа вибрации.

Сравнение полученных фазочастотных характеристик позволяет сделать вывод о качественной сходимости полученных результатов, что в большинстве случаев является достаточным основанием для проведения диагностики. В процессе проведения натурного эксперимента фазочастотная характеристика, полученная с применением орбитального анализа вибрации, показала большую чувствительность в диапазоне до 70 Гц, что вызвано необходимостью наличия воздушного зазора между проксиметром и поверхностью вала, снижающим его чувствительность.

Диапазон рабочих частот проксиметров ограничен низкими частотами, верхний предел которых составляет для разных датчиков 100—150 Гц. Поэтому в диапазоне выше 160 Гц также наблюдается более высокая чувствительность фазочастотной характеристики, полученной с применением орбитального анализа вибрации. Дальнейшие проведенные исследования данного ротора с помощью аналитического и экспериментального модального анализа [31] также подтвердили правильность полученных результатов.

#### **ПРИМЕР ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ ПОДШИПНИКА ОПОРЫ РОТОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИЯ ФАЗЫ КОЛЕБАНИЙ РОТОРА**

Значительный уровень амплитуд колебаний ротора при возникновении резонансных явлений и других процессов, возникающих при некачественном изготовлении и сборке ротора [32], вызывает появление повышенных динамических нагрузок в системе, что в первую очередь приводит к повреждению подшипников их опор из-за значительного увеличения контактных напряжений на дорожках и телах качения.

К примеру, на некоторых авиационных ТРДД в случаях отсутствия или позднего реагирования систем диагностики на повышенные нагрузки из-за близости частот вращения ротора к резонансным частотам (попадания в рабочий диапазон частот) появляются повреждения деталей подшипника межроторной опоры, и в большинстве случаев это усталостное выкрашивание контактирующих поверхностей деталей подшипника, проявляющееся в виде питтинга.

Как показывает практика, в такой сложной динамической многокомпонентной системе, которой является ТРДД, зачастую трудно выявить дефект на ранних стадиях, а еще сложнее определить место дефекта при его возникновении. Особенно низкой контролепригодностью отличаются межроторные подшипники роторных опор, вибрация которых при передаче на корпус двигателя значительно поглощается элементами конструкции двигателя.

При использовании существующих методов контроля, о дефекте подшипника становится известно при его полном повреждении вплоть до заклинивания, а двигатель получает существенные повреждения основных элементов конструкции и не подлежит ремонту и дальнейшей эксплуатации.

Применение метода анализа фазы вибрации позволило выявить питтинг еще на стадии, позволяющей произвести своевременное выключение двигателя в полете и сохранить его ремонтпригодность, что не удавалось сделать другими методами диагностики.



Рис. 7. Питтинг на наружном кольце подшипника опоры ротора.

Как следует из представленной фотографии (рис. 8), повреждение беговой дорожки подшипника развивалось не по всей окружности, а только в ограниченном секторе, это подтверждает, что причиной этого является превышения расчетных нагрузок, вызванное динамическим увеличением дисбаланса при работе двигателя.

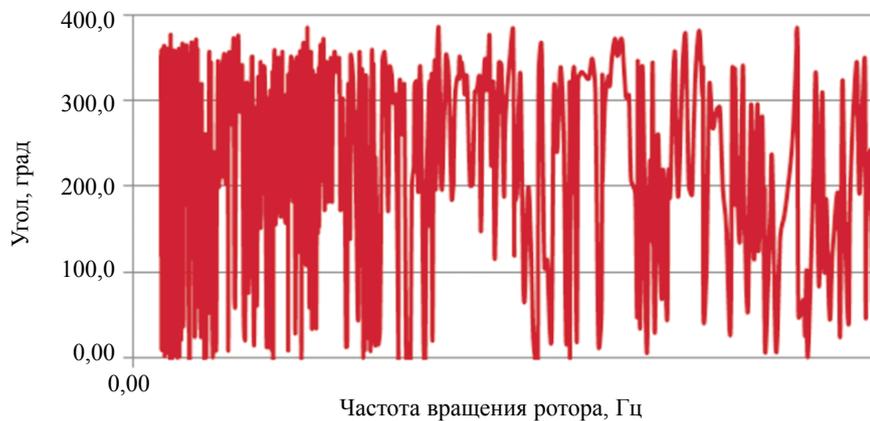


Рис. 8. Изменение фазы поперечной вибрации при развитом питтинге на наружном кольце подшипника опоры.

В результате возникновения поражений процессами питтинга контактирующих поверхностей деталей подшипника, вследствие их взаимодействия с повреждениями, возникает изменение пространственного положения ротора, вызывающее изменение фазы колебаний, интенсивность которого увеличивается с изменением количества повреждений. Изменение положения ротора в подшипниковом зазоре при взаимодействии с повреждениями возникает постоянно, с каждым оборотом, что вызывает постоянное смещение фазы колебаний, являющееся диагностическим признаком изменения технического состояния. При сильных повреждениях беговых дорожек колец подшипника опоры, из-за периодических взаимодействий поврежденных поверхностей его контактирующих деталей, параметры вибрации, в том числе и фаза, приобретают хаотический характер, отображающий прецессионные движения роторов, вызванных неисправностью. Таким образом, отмеченный характер изменения фазы вибрации может быть использован в качестве диагностического признака повреждения рабочих поверхностей подшипника опоры.

В рассмотренном примере подшипник имел повреждения поверхности беговой дорожки кольца, смонтированного на роторе, но при этом вибрационное состояние двигателя соответствовало норме. Изменение фазы колебаний роторов для данного повреждения оказалось единственным диагностическим признаком, информативным на ранних стадиях развития дефекта.

В настоящее время такой подход реализован в модуле вибродиагностики наземного комплекса АРМ «ДК-30СД серии М», используемого для наземного контроля работоспособности двигателей серии АЛ.

### ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Состояние механической системы и изменение ее динамических параметров влияет на числовые характеристики измеряемых параметров. Так, например, уменьшение жесткости из-за ослабления резьбовых соединений элементов конструкции приведет как к снижению значений собственных частот колебательной системы, так и изменению амплитуд колебаний. К примеру, при увеличении жесткости будет расти собственная частота системы, а демпфирование системы будет влиять на величину амплитуды и сдвиг фазы ее колебаний. Это позволяет использовать фазу в качестве контролируемого параметра.

Универсальных подходов, обеспечивающих оценку деграционных процессов технического состояния роторных систем ГТД в условиях эксплуатации, обладающих высокой достоверностью прогноза и практической адекватностью, в настоящее время не создано. Это объясняется сложностью и индивидуальностью как динамической системы каждого экземпляра ГТД, так и практическим отсутствием представительных баз данных по параметрам вибраций, сложностью интерпретации результатов, практическими трудностями применения громоздких и не всегда адекватных (для эксплуатационных условий) математических моделей [33]. Комплексное использование анализа фазы вибрации совместно с другими методами значительно повышает качество проводимого диагностирования и вероятность получения правильного прогноза.

Параметры орбит, а соответственно и значения фазы, полученные с помощью датчиков, установленных на корпусе, будут содержать информацию не только о динамических параметрах ротора, но также и статора, что повышает их диагностическую ценность.

Диагностирование с использованием анализа изменения фазы вибрации еще недостаточно широко применяется в промышленности, но стабильность результатов получаемых прогнозов предполагает широкие перспективы для распространения данного метода.

Для авиационных газотурбинных двигателей метод в ряде случаев может оказаться в числе единственных, качественно работающих в таких условиях.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный подход к определению фазового угла колебаний ротора позволяет с помощью сигналов от датчиков вибрации, установленных на наружном корпусе, выполнять построение фазочастотной характеристики с точностью, приемлемой для выполнения диагностирования ряда повреждений, критичных для дальнейшей работы газотурбинного двигателя. Это дает возможность выполнять контроль и прогнозирование работоспособности газотурбинного двигателя в режиме реального времени и при необходимости обеспечить выдачу управляющего сигнала на изменение режима работы двигателя в систему его автоматического управления.

Главная решенная задача — получение значения фазы с помощью относительных измерений, при отсутствии возможности выполнить абсолютные измерения. Очевидно, существуют технические объекты, у которых существуют такие же трудности в проведении абсолютных измерений, а данный опыт может быть распространен и на них.

Как мы предполагаем, изменение в процессе старения жесткости материалов, из которых изготовлены отдельные детали, при появлении в них дефектов могут изменить фазу колебаний роторных систем. Данный вопрос представляется перспективным для проведения ранней диагностики, но требует дополнительных исследований.

Применение разработанной методики позволит контролировать процесс образования и развития дефектов и повреждений во время эксплуатации ТРДД.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Махутов Н.А., Аксенов С.П., Гаденин М.М., Кондратьев А.Д. Исследование локальных напряженно-деформированных и предельных состояний высокоскоростных роторных конструкций // Насосы. Турбины. Системы. 2018. № 3 (28). С. 5—19.

2. *Алексеев В.В., Больших М.Д., Генкин М.Д.* Вибрации в технике. Т. 5. Измерения и испытания. М.: Машиностроение, 1981. 496 с.
3. *Марчуков Е.Ю., Аксенов С.П.* Обеспечение стабильного производства и условий эксплуатации авиационной техники — залог повышения надежности и безопасности полетов // *Насосы. Турбины. Системы.* 2018. № 4 (29). С. 10—19.
4. *Новиков А.С., Пайкин А.Г., Сиротин Н.Н.* Контроль и диагностика технического состояния газотурбинных двигателей. М.: Изд-во Наука, 2007. 469 с.
5. *Арсентьев В.Г.* Стационарные газотурбинные установки. М.: Машиностроение, 1989. 543 с.
6. Вибрации в технике. Справочник. Т. 1 / Под ред. В.В. Болотина. М.: Машиностроение, 1978. 352 с.
7. *Спицын Н.А., Машнев М.Н., Красковский Е.А., Саверский А.С., Панфилов Е.А., Лейман В.А.* Опоры осей и валов машин и приборов. Ленинград: Машиностроение, 1979. 512 с.
8. *Ward Heylen, Lammens Stefan, Sas Paul.* Modal Analysis Theory and Testing. Belgium, 2007. 319 p.
9. *Гончаров П.С., Артамонов И.А., Халитов Т.Ф.* NX Advanced Simulation. Инженерный анализ. М.: ДМК пресс, 2012. 504 с.
10. *Мормуль Р.В., Павлов Д.А., Сальников А.Ф.* Вибродиагностика и структурный анализ исследования нелинейных динамических процессов роторных турбомашин с магнитным подвесом // *Дефектоскопия.* 2018. № 7. С. 37—44.
11. *Нихамкин М.А.* Вибрационные процессы в газотурбинных двигателях. Пермь: Изд-во ПНИУ, 2011. 118 с.
12. *Белоусов А.И., Кузнецов Н.Д., Иванов В.П., Шорин В.П., Пичугин Д.Ф., Рядченко В.Д.* Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. Куйбышев: Изд-во КуАИ, 1990. 147 с.
13. *Хронин Д.В.* Теория и расчет колебаний в двигателях летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1970. 412 с.
14. Интернет ресурс. [www.blog.vibroekpert.ru](http://www.blog.vibroekpert.ru). Карта блога. Анализ фаз колебаний. 2012 (11.02.20).
15. *Клюев В.В.* (гл. ред.) Неразрушающий контроль / Справочник. Т. 7. М.: Машиностроение, 2006. 829 с.
16. *Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У.* Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.
17. *Mushinsca A.* Rotordynamics. London: Taylor & Francis Group, 2005. 2085 p.
18. *Боришанский К.Н.* Колебания рабочих лопаток паровых турбин и меры борьбы с ними. Art-Xpress, 2011. 126 с.
19. *Русов В.А.* Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам. 2012. Интернет ресурс. [www.vibrocenter.ru/book](http://www.vibrocenter.ru/book) (10.02.20).
20. *Балицкий Ф.Я., Соколова А.Г.* Диагностическая информативность полных спектров и орбит при анализе сигналов относительных вибро смещений вала в опорах скольжения // *Электронный журн. Вестник научно-технического развития.* 2010. № 2 (30). [www.vntf.ru](http://www.vntf.ru) (вход 10.02.20).
21. *Охтилев М.Ю., Хименко В.И.* Мониторинг прецессии роторных систем газотурбинных двигателей и оценка состояния межроторных подшипников // *Электронный журн. Проблемы региональной энергетики.* 2018. № 1 (36). [www.Journal.ie.asm.md](http://www.Journal.ie.asm.md) (10.02.20).
22. *Хименко В.И.* Случайные данные: структура и анализ. М.: Техносфера, 2018. 423 с.
23. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
24. *Мэнли Р.* Анализ и обработка записей колебаний. М.: Машиностроение, 1972. 368 с.
25. *Письменный И.Л.* Многочастотные нелинейные колебания в газотурбинном двигателе. М.: Машиностроение, 1987. 128 с.
26. *Bently D.* Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics. Minden: Bently Pressurized Bearing Press, 2002. 726 p.
27. ГОСТ Р ИСО 13373-3—2016 Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 3. Руководство по диагностированию по параметрам вибрации. М.: Стандартинформ, 2017. 32 с.
28. Патент на изобретение RU 2551447 C1. Способ вибрационной диагностики технического состояния ротора двухвального газотурбинного двигателя.
29. *Зубко А.И.* Оценка возможности использования орбитального анализа вибрации для исследования роторных систем газотурбинных двигателей // *Насосы. Турбины. Системы.* 2015. № 1. С. 97—109.
30. *Scheffer C.* Practical Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance. Amsterdam, 2004. 256 p.
31. *Зубко А.И., Аксенов С.П., Звонарев С.Л., Нецвет В.А., Зубко И.О.* Опыт применения экспериментального модального анализа для контроля качества изготовления и сборки роторов ГТД // *Насосы. Турбины. Системы.* 2020. № 1. С. 14—21.
32. *Filden A.* Nonlinear Oscillations in Mechanical Engineering. Buhl: Germany, 2000. 274 p.

## КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТОВ В ПРОШЕДШЕМ ЧЕРЕЗ МЕТАЛЛ ИМПУЛЬСНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2021 г. В.В. Павлюченко<sup>1</sup>, Е.С. Дорошевич<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Белорусский Национальный Технический Университет, Беларусь 220013 Минск,  
пр-т Независимости, 65  
E-mail: \*ess.doroshevich@gmail.com

Поступила в редакцию 05.07.2021; после доработки 30.08.2021  
Принята к публикации 30.08.2021

Представлены экспериментальные зависимости  $U(t)$  электрического напряжения от времени  $t$ , снимаемого с индукционной магнитной головки (МГ), движущейся относительно магнитного носителя (МН) с записями магнитных полей дефектов объекта из алюминия. Контактный доступ к поверхности металлического объекта, над которой находится слой воздуха и твердого диэлектрика в произвольной пропорции и общей толщиной более 5 мм, исключен полностью. Доступ к тыльной стороне объекта также отсутствует, так как она представляет собой массивный диэлектрик. На объект с МН воздействовали импульсом магнитного поля сложной формы длительностью от 1 до 200 мкс. Исследования проведены в прошедшем через металл поле. Получены растровые изображения скрытых отверстий диаметром 3 и 6 мм в слоях алюминия толщиной 0,67 мм образцов, составленных из слоев алюминия разной толщины и разделенных слоями диэлектрика (воздуха). Толщина металлических слоев образцов составляла 1,96 и 2,96 мм. Измерения проведены в труднодоступных местах образцов. Составлен алгоритм разработанного метода. Метод позволяет значительно повысить чувствительность и точность контроля параметров дефектов и осуществлять их контроль участков объектов, где контроль другими методами невозможен.

*Ключевые слова:* дефект, алюминий, импульсное магнитное поле, прошедшая волна, магнитный носитель.

**DOI:** 10.31857/S0130308221100043

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитографический контроль первоначально был применен для контроля дефектов сварных швов изделий из ферромагнитных конструкционных сталей. С его помощью могут быть надежно выявлены непровары, трещины, поры, шлаковые включения и другие дефекты сплошности [1—3]. Недостатком этого метода является то, что обнаружению дефектов препятствует наличие усиления валика сварного шва, приводящего к неоднородному намагничиванию этой части объекта, а также наличие неоднородностей поверхности шва и прилегающих к нему участков металла.

Нами осуществлен контроль объектов из диа- и парамагнитных материалов в импульсных магнитных полях с помощью магнитного носителя и показаны преимущества этого метода перед другими. Магнитографический метод обладает высокой чувствительностью, обеспечивает высокое разрешение, позволяет осуществлять запись полей дефектов на значительных площадях поверхности объектов и производить измерения в труднодоступных участках объекта.

Авторами проведены расчеты гистерезисной интерференции (НИ) импульсного магнитного поля на магнитном носителе для перекрывающихся с разными временными задержками импульсами магнитного поля разной полярности с получением сложных импульсов разной формы [4]. Ветви гистерезисных зависимостей электрического напряжения, снимаемого с магнитной головки (МГ) для используемого магнитного носителя  $U(H)$ , где  $H$  — напряженность магнитного поля, представлены функциями арктангенса. Полученные расчетные распределения электрического напряжения, снимаемого с МГ при ее движении вдоль координаты  $x$ , позволяют определить с высокой точностью толщину алюминиевых пластин, в том числе алюминиевой фольги толщиной 0,01 мм. Использование НИ позволяет повысить чувствительность измерений и точность контроля толщины в несколько раз по сравнению с безгистерезисными методами.

Еще большую чувствительность и точность определения толщины алюминиевой фольги обеспечивает метод, описанный в [5] при воздействии на магнитный носитель (МН) с объектом сериями разнополярных импульсов магнитного поля линейного индуктора из одного, двух, трех, четырех, пяти и пятнадцати импульсов. Здесь представлен также алгоритм последовательности воздействий.

Как показали наши исследования, определение параметров дефектов в диамагнитных и парамагнитных объектах во многом связано с контролем толщины этих объектов.

В [6] представлены результаты исследования магнитных полей искусственных дефектов сплошности в пластинах из алюминия толщиной от  $1,5 \cdot 10^{-5}$  до  $2,0 \cdot 10^{-3}$  м при воздействии на них импульсами магнитного поля со временем нарастания в интервале  $(1,5—100) \cdot 10^{-6}$  с с использованием МН. Диаметры неоднородностей от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $3 \cdot 10^{-3}$  м при их высоте от  $1,5 \cdot 10^{-5}$  до  $2,5 \cdot 10^{-3}$  м. Здесь представлены зависимости от времени сигнала полей дефектов, снимаемого с МГ с исключением сигнала фона. На основании проведенных исследований получены зависимости амплитуды электрического напряжения датчика от глубины залегания дефектов и толщины слоя материала над ними в указанных диапазонах воздействий. При этом осуществляли запись мгновенных распределений магнитных полей одновременно на значительной площади поверхности объектов.

В [7] проведены исследования сигналограмм, снимаемых с МГ, сканирующей МН с записанными на нем распределениями магнитных полей дефектов сложной формы в виде прорезей в пластинах из алюминия, свинца и меди. Раскрытие дефектов составляло 10—100 мкм при толщине пластин от 60 мкм и выше.

В [8] представлены результаты контроля дефектов сплошности с использованием пленочного флюкс-детектора в сравнении с результатами контроля с помощью магнитного носителя. Здесь показано, что указанными средствами можно вести достаточно точный и оперативный контроль отверстий, щелей и других дефектов в ферромагнитных, парамагнитных и диамагнитных металлах.

Таким образом, как показали наши исследования, МН может быть успешно применен для контроля дефектов сплошности в объектах из диамагнитных и парамагнитных металлов в импульсных магнитных полях.

При этом контроль осуществляли в отраженной волне. Магнитографический метод позволяет записывать мгновенные распределения магнитных полей на площадях в несколько квадратных дециметров с разрешением по координате 0,005 мм и высокими дифференциальной и интегральной чувствительностями. Такими характеристиками не обладает ни один из известных методов контроля, в том числе вихрековые методы [9—12], магнитодинамические [13], магнитоиндукционные [14] и другие магнитные методы [15, 16].

Для повышения скорости контроля информацию с МН можно считывать с помощью магнитооптической пленки. Однако чувствительность и точность измерений при этом уменьшаются по сравнению со считыванием индукционной магнитной головкой.

Во многих случаях условия позволяют проводить испытание материалов в прошедшей волне или одновременно в прошедшей и отраженной волнах, что может значительно повысить качество контроля.

Магнитографический контроль может быть не заменимым при контроле труднодоступных частей объекта, например, поверхностей с узкими щелями между ними, где помещается только тонкий МН. Этот метод обладает рядом других преимуществ перед широко используемыми вихрековыми (не надо сканировать поверхность объекта при записи полей) и ультразвуковыми (не требуется механического контакта с поверхностью объекта) методами.

Целью работы является повышение точности, оперативности и разрешающей способности контроля дефектов сплошности в объектах из диамагнитных и парамагнитных металлов. Поставленная цель достигается тем, что решают задачу контроля в прошедшем через объект импульсном магнитном поле с выделением полей сигналов дефектов из полного сигнала, алгебраическими действиями с этими сигналами, использованием гистерезисной интерференции импульсного магнитного поля и построением алгоритмов воздействующих магнитных полей и условий их распространения.

Таким образом, разрабатываемый метод подобно рентгеновскому методу должен обеспечить получение изображений дефектов в прошедшем через объект поле. Более того, с его помощью можно будет осуществлять контроль дефектов в труднодоступных местах объектов сложной конфигурации, например, в узких щелях, изогнутых и многослойных участках объектов, а также при контроле объектов с нескольких его сторон одновременно или с заданной временной задержкой.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Воздействовали на образцы с приложенным МН импульсами магнитного поля со временем нарастания от 1 до 100 мкс. На рис. 1 — 3 показаны зависимости величины электрического напряжения  $U(t)$ , снимаемого с МГ, сканирующей МН с записями магнитных полей, от времени  $t$  для образца толщиной 2,96 мм. Образец состоял из алюминиевой пластины толщиной 0,67 мм с дефектом в виде отверстия диаметром 6 мм и алюминиевыми пластинами толщиной 1,23 и 1,06 мм над и под пластиной с дефектом соответственно. Масштаб преобразования: одной миллисекунде развертки соответствует отрезок расстояния, равный 1,1 см. Ближняя поверхность указанного образца и всех

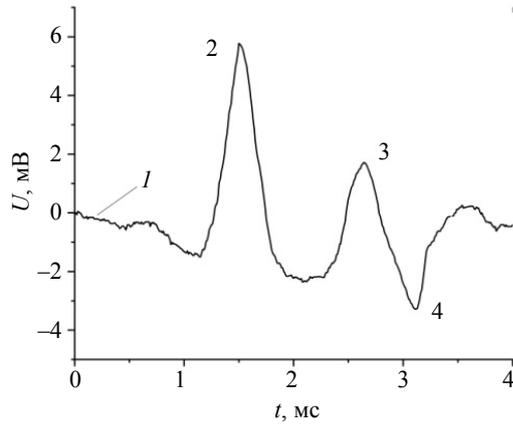


Рис. 1. Зависимость  $U(t)$  1 для образца из алюминия толщиной 2,96 мм с дефектом.

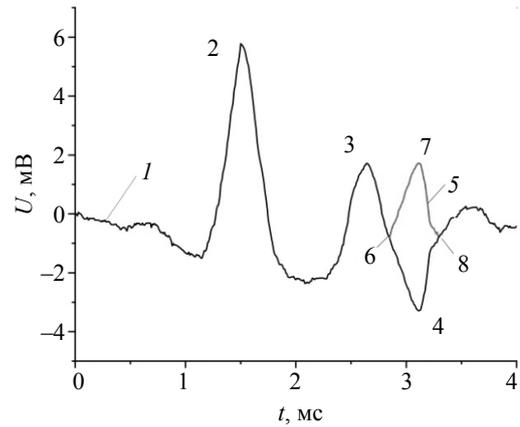


Рис. 2. Прямая 1 и инвертированная 5 зависимости  $U(t)$  для образца из алюминия толщиной 2,96 мм с дефектом.

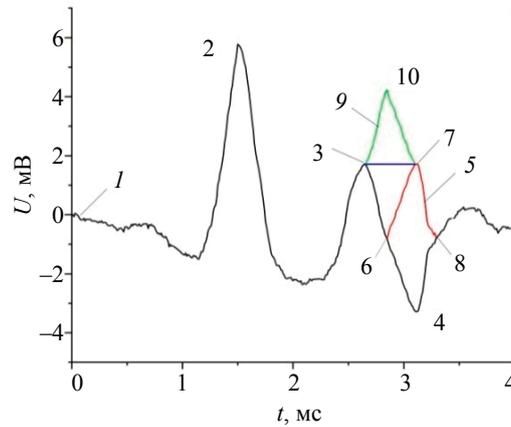


Рис. 3. Прямая 1 и инвертированные 5 и 9 зависимости  $U(t)$  для образца из алюминия толщиной 2,96 мм с дефектом.

остальных образцов, информация о которых показана на последующих рисунках, недоступна для механического контакта, так как над ней находится слой воздуха и твердого диэлектрика. Толщина этого слоя составляет более 5 мм. Воздух и диэлектрик могут чередоваться в нем произвольным образом, что никак не отразится на результатах используемого метода, чего нельзя сказать, например, об ультразвуковом методе. Доступ к тыльной стороне образца, кроме узкого зазора между ней и слоем металла, также отсутствует, так как она представляет собой массивный диэлектрик.

На рис. 1 показана зависимость  $U(t)$  с пиком 2 края МН и пиками 3 и 4 сигнала дефекта. Дальнейшая обработка полученной информации представлена на рис. 2, где показана прямая зависимость  $U(t)$  1 с пиком 2 края МН и пиками дефекта 3 и 4, а также участок инвертированной зависимости  $U(t)$  5 с точкой 6, соответствующей положению оси дефекта, инвертированным пиком дефекта 7 и точкой 8, общей для зависимостей 1 и 5.

На рис. 3 изображены те же зависимости  $U(t)$ , что и на рис. 2, с теми же обозначениями и добавлена вторая инвертированная зависимость 9 с пиком 10 и отрезок прямой 3 – 7. Ширина дефекта соответствует отрезку времени между пиками 3 (2,63 мс) и 7 (3,1 мс) и согласно масштабу преобразования составляет 5,17 мм, что примерно на 0,8 мм меньше диаметра отверстия.

Результаты измерений для образца из алюминия меньшей толщины (верхний слой 1 мм, пластина 0,67 мм с дефектом диаметром 6 мм, нижний слой 0,06 мм) представлены на рис. 4. Здесь показана прямая зависимость  $U(t)$  1 с пиком 2 края МН и пиками дефекта 3 и 4, а также участок

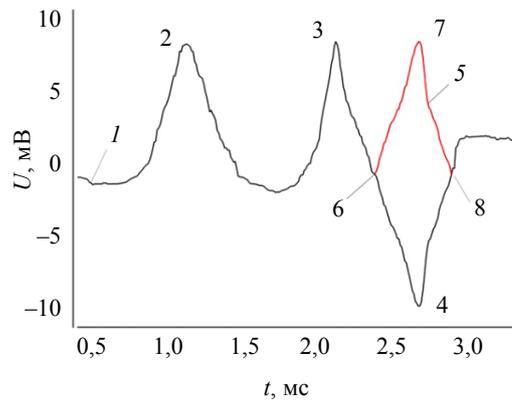


Рис. 4. Прямая 1 и инвертированная 5 зависимости  $U(t)$  для образца из алюминия толщиной 1,96 мм с дефектом.

инвертированной зависимости  $U(t)$  5 с пиком 6, соответствующим положению оси дефекта, инвертированным пиком 7 сигнала дефекта и точкой 8, общей для зависимостей 1 и 5. Ширина дефекта соответствует отрезку времени между пиками 3 (2,12 мс) и 7 (2,67 мс) и согласно масштабу преобразования составляет 6,05 мм, что с точностью до 0,05 мм соответствует диаметру отверстия.

Таким образом, полученные результаты позволяют с высокой точностью контролировать параметры внутренних дефектов в виде скрытых отверстий диаметром в несколько миллиметров в алюминиевых образцах толщиной от доли миллиметра до нескольких миллиметров. При этом с увеличением толщины слоя металла за дефектом расстояние между дифференциальными максимумами сигнала дефекта 3 и 4 уменьшается.

При построении графиков на рис. 1—4 была произведена обработка полученной информации с усреднением сигнала по нескольким точкам и его сглаживание, а также с применением других операций. В результате этих действий в несколько раз (в 2 – 10 раз) уменьшено влияние фона приборных и сетевых наводок и помех, эфирного фона электромагнитных помех, фона локальных дефектов МН (локальных изломов и повреждений рабочего слоя при его локальном физическом износе), а также влияние резонансного фона самовозбуждения измерительной системы, фона помех, создаваемых нарушением контакта МГ и МН при контактном коллекторном съеме напряжения с вращающейся МГ.

На последующих рисунках (рис. 5—8) приведены зависимости  $U(t)$  без устранения фонов помех, то есть без дополнительной обработки полученной информации.

На рис. 5 показаны зависимости  $U(t)$  для образца из алюминия толщиной 1,96 мм с дефектом (отверстие диаметром 6 мм) с разной величиной смещения линии сканирования МГ относительно

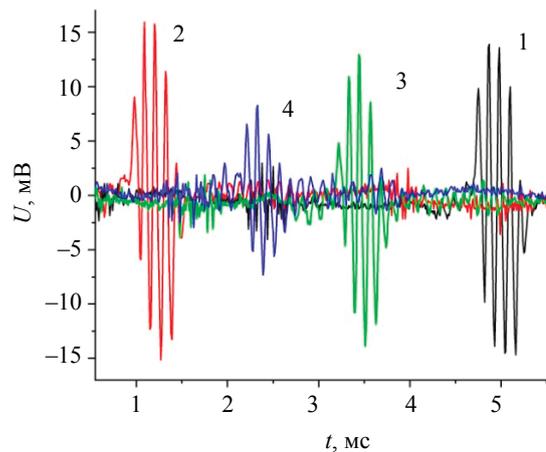


Рис. 5. Зависимости  $U(t)$  для образца из алюминия толщиной 1,96 мм с дефектом: 1, 2, 3 и 4 — смещение относительно оси дефекта равно соответственно 0, 1, 2, 3 мм.

оси дефекта. В качестве датчика использован дискретный датчик магнитного поля (ДДМП), состоящий из магнитных полос. Амплитуда пиков ДДМП при воздействии на него одним импульсом магнитного поля пропорциональна максимальной величине напряженности измеряемого магнитного поля. В случае воздействия несколькими импульсами амплитуды пиков соответствуют напряженностям магнитного поля, определяемым по установленным нами арктангенсным зависимостям ветвей гистерезиса используемого магнитного носителя [5].

Сравнение пиков сигнала дефекта 3 и 4 на рис. 1 и максимальных пиков распределения 1, соответствующих сканированию МГ по оси дефекта, позволяет определить преимущества использования сплошного и дискретного датчиков магнитного поля. Так, дифференциальные зависимости (см. рис. 1) дают довольно точные границы дефекта, а интегральные (см. рис. 5) обладают большей чувствительностью и дают возможность находить распределение напряженности магнитного поля над (под) дефектом и на других участках поверхности объекта.

Для повышения чувствительности измерений откорректируем параметры элементов измерительной системы в сторону приближения частоты ее собственных колебаний к частоте получаемых сигналов и сравним полученные зависимости с зависимостями на рис. 5. Так, на рис. 6 показаны зависимости  $U(t)$  для образца из алюминия толщиной 1,96 мм с внутренним дефектом диаметром 6 мм. Зависимости 1 и 3 получены с начальной чувствительностью, соответствующей чувствительности измерений на рис. 5, а 2 и 4 — с повышенной чувствительностью. Из сравнения рис. 5 и рис. 6 видно, что относительное распределение пиков осталось прежним, а их амплитуда увеличилась примерно в 1,35 раза. При этом пики резонансных частот (дополнительные пики) в зависимостях на рис. 6 не проявляются.

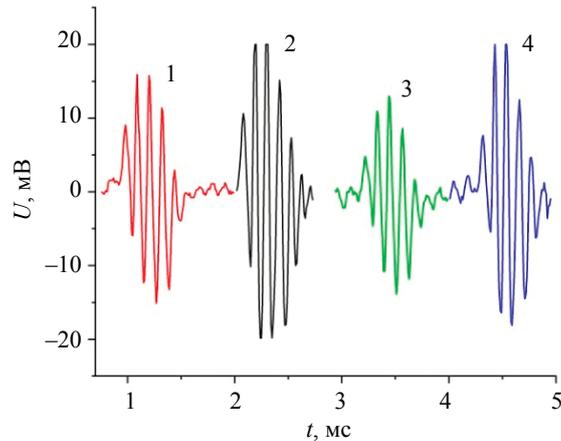


Рис. 6. Зависимости  $U(t)$  для образца с дефектом: 1, 2 — сдвиг относительно оси дефекта 1 мм; 3 и 4 — сдвиг 2 мм.

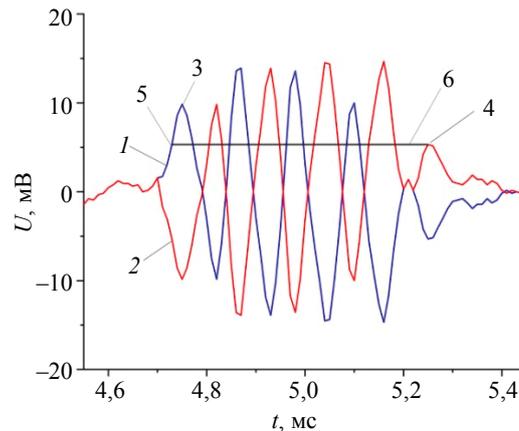


Рис. 7. Прямая 1 и инвертированная 2 зависимости  $U(t)$  с пиками 3 и 4 и отрезком изображения дефекта 6 между точками 5 и 4 по горизонтальной оси дефекта.

Перенесем зависимость  $U(t)$  1 рис. 5 на рис. 7 и обозначим ее цифрой 1. Построим инвертированную ей зависимость 2. Найдем временную координату пика 4 (5,25 мс; 5,3125 мВ), построим отрезок прямой  $U = 5,3125$  мВ до пересечения с зависимостью 1 в точке (4,73 мс; 5,3125 мВ).

Этот отрезок прямой является отрезком изображения дефекта и соответствует положению его диаметра по горизонтали. Установим шаг сканирования МН магнитной головкой, равный 0,43 мм, и на основании полученных табличных данных измерений построим изображение 9 дефекта на рис. 8 в виде 15 отрезков линий (растровое изображение, вид сверху).

На рис. 8 показана также зависимость  $U(t)$ , изображенная на рис. 2, с такими же обозначениями 1—8. Здесь для привязки к координатам МН представлена растровая полоса 10, соответствующая переднему краю МН с выбранным уровнем сигнала в точке (1,48 мс; 5,156 мВ) вблизи пика 2 и растровая полоса 11 с уровнем сигнала в точке (3,83 мс; -0,5 мВ).

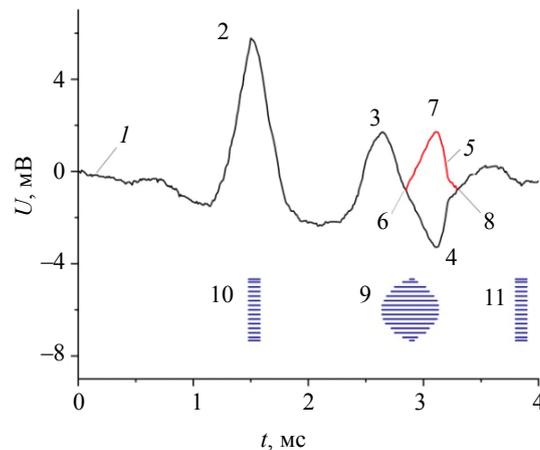


Рис. 8. Прямая 1 и инвертированная 5 зависимости  $U(t)$  для образца из алюминия толщиной 2,96 мм с растровым изображением дефекта 9.

Растровое изображение дефекта 9 и полос 10 и 11 выполнено в следующем масштабе: одной миллисекунде развертки соответствует отрезок 1,1 см расстояния по горизонтали, а одному милливольту сигнала соответствует отрезок 2,25 мм расстояния по вертикали. Положению вертикальной оси изображения дефекта 9 соответствует координата точки 6 на рис. 8.

Таким образом, получено изображение дефекта в прошедшем через объект поле, аналогичное рентгеновскому изображению этого дефекта.

Растровое изображение внутреннего дефекта в прошедшей волне может быть получено не только с помощью ДДМП, как это показано выше. Для этого может быть использована дифференциальная зависимость  $U(t)$  1, соответствующая движению МГ вдоль горизонтальной оси дефекта, а также зависимости  $U(t)$  при движении МГ вдоль параллельных этой оси направлений с заданным шагом сканирования. При этом положению дефекта соответствуют координаты точек 3 и 4 зависимости 1 на рис. 1 и аналогичные точки зависимостей  $U(t)$  сканирования в параллельных направлениях. То же самое может быть сделано с использованием точек 3 и 7 зависимости 1 на рис. 2. При другом способе выделения информации сигнал  $U(t)$  1 на рис. 1 может быть проинтегрирован с помощью электронного интегрирующего устройства в процессе считывания информации с МН или при ее последующей обработке и получена зависимость, близкая по своим параметрам к зависимости 9 на рис. 3. В результате будет построен отрезок горизонтальной прямой между точками 3 и 7 зависимости 1 на рис. 3, соответствующий положению диаметра дефекта.

Преимущества метода могут быть показаны с использованием чертежа на рис. 9. Здесь последовательно сверху вниз изображены: слой диэлектрика 1 толщиной 0,5 мм, слой воздуха 2 (5 мм), алюминиевая пластина 3 (0,4 мм), слой воздуха 4 (0,5 мм), алюминиевая пластина 5 (1 мм), алюминиевая пластина 6 (0,67 мм) с отверстием 7 диаметром 3 мм, алюминиевая пластина 8 (0,18 мм), слой воздуха 9 (0,5 мм) с магнитным носителем 10 и массивный слой диэлектрика 11 (5 мм и более).

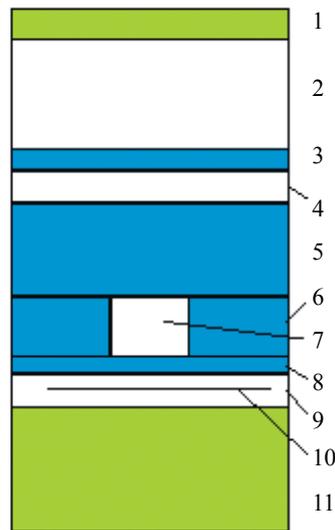


Рис. 9. Образец из алюминия с дефектом и слоями воздуха, диэлектрика и алюминия.

Слой воздуха 2, в котором могут находиться части твердого или жидкого диэлектрика в любой пропорции, удаляет объект контроля от средств контроля и не позволяет достаточно эффективно использовать ультразвуковые, магнитные и электромагнитные методы контроля.

Тонкий слой воздуха 9 не может обеспечить доступ в него преобразователей магнитного поля, кроме магнитного носителя толщиной менее 0,1 мм, работающего в режиме остаточного намагничивания.

В результате воздействия на указанный образец с МН импульсом магнитного поля получена зависимость  $U(t)$  (рис. 10) с пиками сигнала 2 и 6 края МН, пиком сигнала дефекта МН 3, пиками сигнала дефекта образца 4 и 5 и сигналами фона помех и наводок 7. На основании указанной зависимости построено растровое изображение 8 дефекта образцас изображением полос, соответствующих пикам краев МН 2 и 6 и пику дефекта МН 3.

Изображение дефекта 7 (рис. 9) было получено также при толщине пластины 8 (см. рис. 9) из алюминия около 1 мм и больше.

Исследования показали, что дефект 7 может быть выявлен при толщинах слоев диэлектрика и металла 1 — 5, более чем в 3 раза превосходящих их указанные размеры.

Представленный метод позволяет значительно повысить чувствительность и точность определения параметров дефектов за счет оптимизации параметров импульсов первичного магнитного

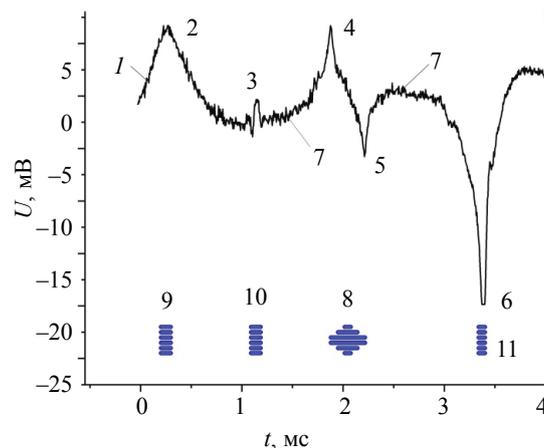


Рис. 10. Зависимость  $U(t)$  для образца, изображенного на рис. 9, с растровым изображением дефекта 8.

поля и способов записи, обработки и выделения полей дефектов и фона и осуществлять контроль труднодоступных участков объектов, где другие методы неприменимы.

Составлен алгоритм разработанного метода с указанием геометрических размеров и формы источника первичного магнитного поля, максимальной напряженности магнитного поля в зоне контроля, амплитуды и времени нарастания импульса поля, параметров переднего и заднего фронтов импульса, амплитуд и времени нарастания выбросов поля, характеристик гистерезисных ветвей используемого магнитного носителя. Алгоритм содержит также методы обработки полученной информации с выделением сигнала поля дефекта из полного сигнала с исключением фона сигнала, обусловленного неоднородностью магнитного поля локального источника, фона дефектов и структурных неоднородностей объекта, эфирного электромагнитного фона, фона самовозбуждения измерительной системы, включающей МГ, на сигналах краев МН, дефектов МН, приборных и сетевых наводок и помех, дефектов объекта, эфирных электромагнитных полей, а также с исключением фона контактного коллекторного съема с МГ.

Разрабатываемые нами алгоритмы контроля с помощью МН могут быть применены при использовании других известных преобразователей, например, матриц индукционных катушек и вихретоковых преобразователей, матриц преобразователей Холла, магнитооптической пленки, пленочных флюкс-детекторов.

## ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований получены экспериментальные зависимости  $U(t)$  электрического напряжения от времени  $t$ , снимаемого с индукционной магнитной головки (МГ), движущейся относительно магнитного носителя (МН) с записями магнитных полей дефектов в виде отверстий в алюминиевых пластинах, закрытых слоями металла. При этом контактный доступ к поверхности металлического объекта, над которой находится слой воздуха и твердого диэлектрика, исключен полностью. Толщина этого слоя составляет более 5 мм. Воздух и диэлектрик могут чередоваться в нем произвольным образом. Доступ к тыльной стороне объекта также отсутствует, так как она представляет собой массивный диэлектрик. Внутри образца также отсутствуют воздушные зазоры, затрудняющие процесс контроля. Их ширина составляет 0,5 мм.

На объект с МН воздействовали импульсом магнитного поля сложной формы с выбросами магнитного поля общей длительностью от 1 до 200 мкс. Исследования проведены в прошедшем через металл поле. Получены растровые изображения скрытых отверстий диаметром 3 и 6 мм в слоях алюминия толщиной 0,67 мм образцов, составленных из слоев алюминия разной толщины и разделенных слоями диэлектрика (воздуха). Суммарная толщина металлических слоев образцов составляла 1,96 и 2,96 мм. Показаны результаты измерения в труднодоступном месте образца, а именно, в щели шириной 0,5 мм между металлическими и диэлектрическими слоями образца. Составлен алгоритм разработанного метода с указанием параметров переднего и заднего фронтов импульса поля, амплитуд и времени нарастания выбросов поля, выделением сигнала поля дефекта из полного сигнала с исключением фона сигнала, обусловленного неоднородностью магнитного поля локального источника, фона дефектов МН и структурных неоднородностей, фона самовозбуждения измерительной системы, других фонов электрических помех и наводок.

Представленный метод позволяет значительно повысить чувствительность и точность определения параметров дефектов за счет оптимизации параметров импульсов первичного магнитного поля и способов записи, обработки и выделения полей дефектов и фона и осуществлять контроль труднодоступных участков объектов, где другие методы не применимы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фалькевич А.С., Хусанов М.Х.* Магнитографический контроль сварных соединений. М.: Машиностроение, 1966. 176 с.
2. *Козлов В.С.* Техника магнитографической дефектоскопии. Мн.: Вышэйшая школа, 1976. 256 с.
3. *Михайлов С.П., Щербинин В.Е.* Физические основы магнитографической дефектоскопии. М.: Наука, 1992. 238 с.
4. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Hysteretic Interference of Time-Overlapping Magnetic Field Pulses // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 12. P. 949—956.
5. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Imaging Electric Signals of a Magnetic Field Transducer with Hysteretic Interference for Testing Metals in Pulsed Magnetic Fields // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 11. P. 907—914.

6. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* A Method of Pulsed Magnetic Testing for Discontinuities in Objects Made of Diamagnetic and Paramagnetic Metals Using a Magnetic Carrier // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 12. P. 877—886.
7. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Detecting Extended Complex-Shaped Defects in Electroconductive Plates Using a Magnetic Carrier // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 3. P. 217—224.
8. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Testing for Discontinuities in Metals Using Film Flux // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 1. P. 48—58.
9. *Ферстер Ф.* Неразрушающий контроль методом магнитных полей рассеяния. Теоретические и экспериментальные основы выявления поверхностных дефектов конечной и бесконечной глубины // Дефектоскопия. 1984. № 12. С. 13—18.
10. *Егоров А.В., Поляков В.В.* Вихретоковый контроль металлических материалов с помощью проекционных методов многомерного анализа данных // Дефектоскопия. 2018. № 5. С. 55—62.
11. *Атавин В.Г., Узких А.А., Исхужин Р.Р.* Отстройка от электропроводности основания при измерении толщины токопроводящих покрытий методом вихревых токов // Дефектоскопия. 2018. № 1. С. 58—64.
12. *Астахов В.И., Данилина Э.М., Ершов Ю.К.* К вопросу о диагностике пластины с трещиной вихретоковым методом // Дефектоскопия. 2018. № 3. С. 39—49.
13. *Лухвич А.А., Булатов О.В., Лукьянов А.Л.* Возможности магнитодинамического метода контроля толщины покрытий с неоднородными свойствами (эксперимент) // Дефектоскопия. 2009. № 11. С. 46—53.
14. *Суханов Д.Я., Совпель Е.С.* Магнитоиндукционная томография электрических схем и приборов // Известия высших учебных заведения. 2015. Т. 58. № 10/3. С. 73—75.
15. *Новослугина А.П., Смородинский Я.Г.* Анализ топографии магнитных полей рассеяния в ферромагнитных изделиях // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 2. С. 33—37.
16. *Николаев Ю.Л., Шкатов П.Н., Чернова А.В.* Исследование сигнала от тангенциальной составляющей магнитных потоков рассеяния поверхностного дефекта при его регистрации виброиндукционным преобразователем // Дефектоскопия. 2018. № 5. С. 50—54.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

© 2021 г. А.А. Беспалько<sup>1,\*</sup>, Д.Д. Данин<sup>1,\*\*</sup>, М. В. Петров<sup>1</sup>, Е.К. Помишин<sup>1</sup>,  
Г.Е. Уцын<sup>2</sup>, П. И. Федотов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30

<sup>2</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
Россия 634050 Томск, пр. Ленина, 40

E-mail: \*besko48@tpu.ru; \*\*dddann@tpu.ru; \*\*\*mvp17@tpu.ru

Поступила в редакцию 06.09.2021; после доработки 16.09.2021

Принята к публикации 24.09.2021

Обсуждаются комплексные методы механико-электрического и акустико-электрического тестирования трещинообразования при изменении напряженно-деформированного состояния на примере диэлектрических образцов горных пород. В статье рассматриваются результаты численных и экспериментальных исследований изменения параметров электромагнитных откликов при импульсном детерминированном акустическом возбуждении образцов горных пород с различным составом и текстурой. Представлены результаты математических расчетов концентрации напряжений на трещинах расположенных вдоль оси образца, перпендикулярно которой вводились детерминированные акустические импульсы. Показаны результаты экспериментальных исследований электромагнитной эмиссии образца с содержанием кальцита и магнетита при одноосном сжатии до разрушения. Приведены закономерности изменений амплитуд электромагнитных сигналов при акустическом зондирования в процессе «ступенчатого» одноосного нагружения сжатием до разрушения.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, диэлектрики, горные породы, акустическое воздействие, электромагнитная эмиссия.

DOI: 10.31857/S0130308221100055

### ВВЕДЕНИЕ

В статье представлены новые методы тестирования дефектности и развития разрушения диэлектрических гетерогенных материалов, которые основаны на механико-электрических (МЭП) и акустико-электрических (АЭП) преобразованиях в них, результатом которых являются, соответственно, электромагнитная эмиссия (ЭМЭ) и электромагнитные сигналы (ЭМС). Механико-электрические преобразования происходят в твердотельных структурах при изменении их напряженно-деформированного состояния под воздействием механической нагрузки, сопровождающейся акустической эмиссией внутри испытываемого материала. Возникающие акустические импульсы вызывают колебания заряженных бортов окружающих и растущих трещин, контактов материалов и дефектов. В результате генерируются ЭМС с разными амплитудно-частотными параметрами, последовательность которых определяется как ЭМЭ. Эмиссия в этом случае характеризуется изменяющейся амплитудой и частотой следования ЭМС. Связь акустической и электромагнитной эмиссий проверялась на модельных образцах и при изменении напряженно-деформированного состояния породного массива после массовых взрывов на Таштагольском железорудном месторождении [1—3]. При этом акустическую эмиссию регистрировали пьезоэлектрическим приемником, а ЭМЭ — емкостным датчиком.

Внешнее акустическое воздействие на твердотельные диэлектрические материалы и структуры также вызывает появление электромагнитных сигналов при наличии дефектов или трещинообразования. Связь внешнего акустического воздействия и генерации ЭМС называют акустико-электрическим преобразованием. В этом случае параметры электромагнитных сигналов наряду с электрическими и прочностными свойствами тестируемого материала определяются и характеристиками возбуждающего акустического сигнала. Исследования электромагнитного излучения осуществлялось для разных диэлектрических материалов, в том числе при их разрушении под воздействием внешних нагрузок и детерминированного акустического воздействия [4—15]. Эти исследования проводились для тестирования дефектности и развития процессов разрушения твердотельных диэлектрических материалов, в том числе горных пород. Наличие, появление, количественное или качественное изменение электрических зарядов является обязательной причиной возникновения ЭМС.

Электризация контактов разнородных материалов и сред может происходить в результате: разности работы выхода электронов с поверхностями контактирующих материалов; движения дислокаций и сбором при их движении заряженных точечных дефектов с локализацией у поверхностей раздела сред; трения слоев и др. [16—23]. При прорастании трещин тоже происходит зарядение бортов трещин в результате разделения частиц с разным итоговым зарядом [11, 12]. В работе [20] детально рассмотрены вопросы зарядения слоев горных пород с разной текстурой и составом, а в работе [24] — заряженные трещины в виде системы диполей, у которых беспорядочная ориентация дипольных моментов. На некотором этапе механического воздействия эти диполи приобретают преимущественную ориентацию. При этом рассчитывалась величины напряженности электрического поля, являющейся функцией, как элементарных источников, так и среднего значения их электрического момента.

В работах [6, 7] выявлено, что при воздействии акустической волны формируется ЭМС, которые являются следствием колебательных движений двойных электрических слоев и флуктуационно-заряженных берегов микротрещин, освобождением и колебанием заряженных дислокаций. При этом параметры ЭМС определяются амплитудно-частотным спектром акустического поля. Авторы этих работ провели математическое и физическое обоснование тестирования дефектности диэлектрических гетерогенных материалов по параметрам электромагнитного сигнала. Указывается, что в случае, когда нормированным однократным ударом возбуждаются механические колебания, то это должно способствовать появлению тока смещения. При этом амплитудно-частотные параметры ЭМС зависят от характеристик акустических импульсов, диэлектрических свойств твердотельных материалов и зарядового состояния имеющихся дефектов, в том числе в виде включений, полостей и трещин.

Таким образом, формирование ЭМС обусловлено изменением зарядового состояния тестируемого материала при развитии трещин различного масштаба или двойных электрических слоев на контактах сред и минералов, а также на контактах с водными растворами. Для диэлектрических материалов, используемых при воздействии механических нагрузок любого типа, могут применяться механико-электрические методы с использованием акустических импульсов, испускаемых разрастающимися трещинами разной длины, и электромагнитных сигналов, возникающих при колебании заряженных берегов трещин, окружающих источник акустических импульсов. В качестве альтернативного метода тестирования развития трещинообразования является внешнее акустическое воздействие детерминированными акустическими видео или радиоимпульсами с регистрацией возбуждаемых ими ЭМС и последующим их амплитудно-частотным анализом [8, 10, 14, 25]. Исследование закономерных изменений характеристик ЭМЭ и параметров ЭМС при нарастании нагрузок и внешнем акустическом воздействии на диэлектрические материалы и структуры позволит развить механико-электрические и акустико-электрические методы до практического применения при постоянном тестировании процессов развития трещинообразования и разрушения.

## МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования механико-электрических и акустико-электрических преобразований проводили на образцах горных пород Таштагольского железорудного месторождения, в которых возможно было подобрать разное соотношение магнетита и кальцита. Эти минералы отличаются предельной прочностью: кальцит в зависимости от формы включения в горной породе —  $(12—50) \times 10^6$  Па [26]; магнетитовая руда по экспериментальным данным измерений разрушения кернов диаметром 0,042 м —  $(14—21,5) \times 10^7$  Па. Известно, что предел прочности хрупких материалов прямолинейно соотносится с твердостью по шкале Мооса [26, 27], поэтому можно производить сравнение полученных экспериментальных закономерностей ЭМЭ и по твердости минералов составляющих магнетитовую руду, которая для кальцита имеет значение 3, а для магнетита — 6. Кроме того, кальцит и магнетит существенно различаются и по электрическим характеристикам. Так, удельное электрическое сопротивление кальцита  $\rho_k$  составляет  $(10^7—10^{12})$  Ом·м, а магнетита — в пределах  $(10^{-5}—10^4)$  Ом·м [26, 28]. Процентное содержание магнетита уточняли после разрушения образцов с использованием порошкового рентгеновского дифрактометра X'TRA [29]. Содержание магнетита в используемых образцах колебалось от 60 до 77 процентов. Помимо этого использовали образцы скарна, также содержащие магнетит. Размеры образцов имели диаметр  $(42 \pm 1) \times 10^{-3}$  м и длину  $(80 \pm 5) \times 10^{-3}$  м.

Исследования параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ при одноосных нагрузках сжатием осуществляли на стенде, блок-схема которого приведена на рис. 1.

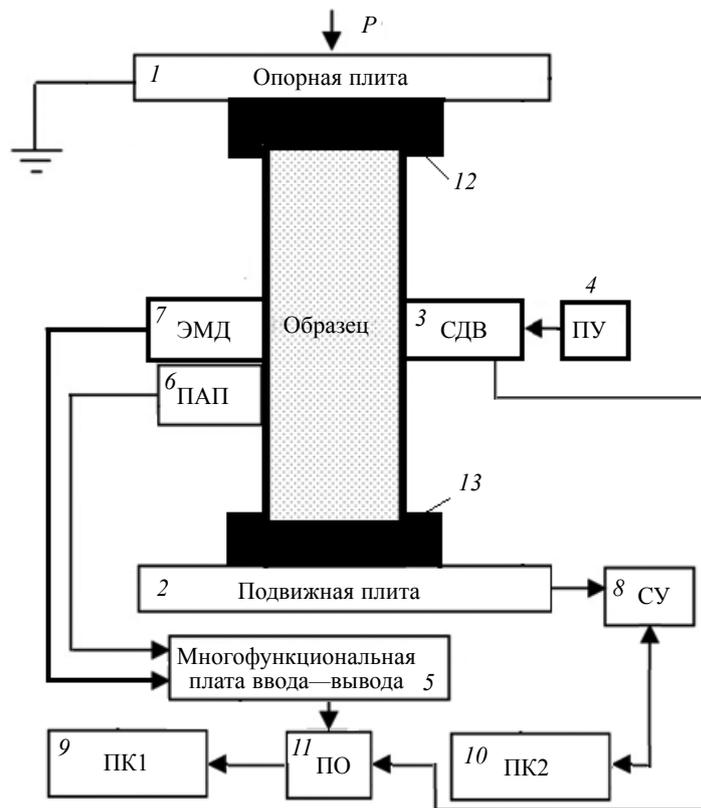


Рис. 1. Блок-схема стенда для одноосного сжатия исследуемых образцов:

1 — опорная плита прессы ИП500.1; 2 — подвижная плита прессы ИП500.1; 3 — система динамического возбуждения для контроля энергии удара шариком; 4 — пружинное устройство ПУ разгона шарика для ввода в образец детерминированного акустического импульса; 5 — многофункциональная плата ввода—вывода NI BNC 2120; 6 — пьезоэлектрический приемник акустических импульсов ПАП; 7 — электромагнитный дифференциальный ЭМД емкостной датчик; 8 — система управления СУ прессом с сервоклапаном; 9 — персональный компьютер ПК1 для визуализации и амплитудно-частотного анализа акустических и электромагнитных сигналов; 10 — персональный компьютер ПК2 для ввода задания сервоприводу прессы и вывода информации о прилагаемых напряжениях и деформации образца; 11 — блок программного обеспечения; 12 и 13 — держатели для центрирования образца.

В процессе эксперимента образец располагали между опорной (1) и подвижной (2) автоматизированного прессы ИП500.1, который развивал усилие  $P$  на образце до 500 кН. Нагрузка и скорость нагружения образца задавались с помощью специализированной программы с компьютера ПК2 (10) через систему управления СУ (8) на исполнительный механизм сервоклапана. Причем изменения нагрузки могло быть задано линейным, ступенчатым или циклическим. Для центрирования образцов использовали специальные держатели 12 и 13. Запись информации об изменениях деформации образца от прилагаемых усилий и их вид записывались и отображались также на мониторе компьютера ПК2. Одноосное сжатие проводили при постоянной скорости 0,3 Па/с. Акустическое импульсное возбуждение образцов ударом шарика проводилось с помощью пружинного устройства разгона ударяющего шарика ПУ (4) через систему контроля энергии удара СДВ (3) [12, 23]. Форма акустического импульса была близка к колоколообразному распределению Гаусса, а длительность его на уровне 0.1 от основания составляла  $50 \times 10^{-6}$  с. Точечный удар шариком массой  $8.6 \times 10^{-4}$  кг наносился посередине свободной цилиндрической части образца. После пролета через 3 шарик ударялся в стальную закаленную пластину толщиной  $2 \times 10^{-3}$  м, возбуждал детерминированный акустический импульс, который через слой минерального масла между пластиной и образцом проходил в образец. Твердость стали пластины и шарика имели равные значения. Остаточная энергия удара, вводимая в образец, после отскока шарика составляла  $(5-30) \times 10^{-3}$  Дж. Акустический сигнал, проходя через образец, регистрировался пьезоэлектрическим приемником акустических импульсов ПАП (6).

Система СДВ состояла из металлической трубки с двумя оптическими парами, встроенными в нее на расстоянии  $5 \times 10^{-2}$  м, каждая из которых включала свето- и фотодиод. Шарик, пролетая через оптические пары, давал две отметки на мониторе компьютера ПК1 (9). По этим отметкам

рассчитывались скорости налета  $V_1$  и отскока  $V_2$  шарика. По вычисленным скоростям определяли кинетическую энергию акустического воздействия, передаваемую образцу.

Электрическую составляющую ЭМС, генерируемого образцом при прохождении акустического сигнала, принимали дифференциальным емкостным датчиком ЭМД (7) со встроенным усилителем мощности. В датчике использовались фильтры нижних и верхних частот, которые обеспечивали его работу в диапазоне от 1 до 100 кГц. На выходе ЭМД сигнал усиливался с коэффициентом 10 или 100. При измерениях коэффициент усиления выбирался в зависимости от амплитуды входного ЭМС. Чувствительность ЭМД по входу  $5 \times 10^{-4}$  В. Сигналы с ЭМД и ПАП через multifunctionальную плату NI VNC 2120 (5) передавался на КПП (9). В дальнейшем с помощью специальной программы ПО (11) амплитуда ЭМС нормировалась по амплитуде акустического импульса, возбуждаемого ударом шарика, и по программе быстрого преобразования Фурье производился амплитудно-частотный анализ ЭМС.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе рассматриваются результаты численного и экспериментального исследования изменения параметров электромагнитных сигналов, генерируемых при детерминированном акустическом возбуждении образцов горных пород при развитии трещинообразования и разрушения. Экспериментально исследовали закономерности изменений характеристик ЭМЭ при одноосном сжатии до разрушающих значений образца. Эти исследования проводились для определения применимости механико-электрических методов при тестировании развития деструктивных зон и разрушения в диэлектрических материалах. Исследовались также закономерности изменения параметров ЭМС при детерминированном акустическом зондировании в процессе нарастания сжимающих нагрузок до разрушения образца. Здесь использовалось «ступенчатое» нагружение, при котором в течение необходимого для проведения экспериментальных действий поддерживался выбранный уровень одноосного сжатия. В этом случае определялась перспективность тестирования развития деструкции образцов акустико-электрическим методом.

Так как амплитудно-частотные параметры ЭМС зависят от характеристик акустических импульсов, то в настоящей работе было проведено численное моделирование распространения акустического импульса в упругой неоднородной среде ограниченных размеров с заданными физико-механическими свойствами при воздействии этим импульсом на часть ее поверхности. Проводился расчет параметров напряженно-деформированного состояния (перемещения, деформации, напряжения). Использовалась простейшая классическая модель твердого тела. Задача волновой механики решалась с использованием таких гипотез, традиционных для классической модели упругой среды, как, например, однородности и сплошности [30—31]. При наличии каких-либо неоднородностей вследствие дефектов или включений эти неоднородности учитывались явным образом, то есть входили в постановку задач. В общем случае система уравнений, описывающая поведение деформируемого твердого тела в пространстве декартовой системы координат, включает в себя: уравнения движения, уравнения неразрывности, соотношения для компонент тензора скоростей полных деформаций и определяющие соотношения. В частном случае эта система уравнений задает связь между компонентами тензоров напряжений и деформаций.

Для используемых в экспериментах образцов такая модель может применяться с некоторыми допущениями. Например, при решении задач о распространении волн принимается, что пористостью, а также другими неоднородностями можно пренебречь. Граничные условия соответствовали лабораторному эксперименту, а именно на нижней и верхней границах образца задавались нулевые смещения, так как в лабораторном эксперименте образец устанавливали между сжимающими пуансонами пресса. Боковые грани свободны, поэтому напряжения на границе равны нулю. Посередине свободной боковой поверхности образца от сжимающих пуансонов пресса задавалась акустическая нагрузка в виде плавно нарастающей и затем плавно убывающей функции имеющая зависимость от времени и пространственных координат. Импульс возбуждения соответствовал используемому воздействию в экспериментах по форме, амплитуде и длительности. По окончании импульсной нагрузки на поверхности напряжения задаются нулевыми значениями.

Для определения изменений во времени напряженного состояния образцов при одноосном сжатии и развития разрушения использовали объемную расчетную схему метода МакКормака [32—36], являющуюся конечно-разностным методом типа предиктор-корректор. Эта схема относится к схемам сквозного счета, в соответствии с ней специальным образом не выделяется положение волнового фронта, а проводится анализ всей расчетной области для каждого момента времени, что является необходимостью для последующего использования результатов моделиро-

вания. Схема МакКормака предполагает использование прямоугольной схемы расчетной сетки, которая имеет ряд преимуществ: упрощение математических расчетов, затрачивается меньше машинного времени для расчетов, упрощается постановка граничных условий, упрощается обработка результатов без потери информации. Наилучшие результаты дают сетки с квадратными ячейками, так как минимизируется эффект «песочных часов», то есть перекручивание ячеек сетки. Численный алгоритм этого метода аналогичен методу Рунге—Кутта для решения обыкновенных дифференциальных уравнений. Для того чтобы по известному смещению в материале  $U(t)$  можно было получить решения на следующем шаге по времени  $U(t + \Delta t)$ , необходима одна или несколько итераций. Прежде чем использовать метод типа метода Рунге—Кутта второго порядка точности, пространственные производные в уравнениях заменялись соответствующими отношениями конечных разностей. Предлагается использовать нецентральные разностные операторы, например, попеременно левые или правые разности вместо центральных разностей. Такой подход и положен в основу эффективной нецентральной схемы второго порядка, предложенной МакКормаком. Преимущества нецентральных схем по сравнению с большинством обычных центральных схем состоит в том, что упрощается логика программы, легко включаются неоднородные члены и непосредственно осуществляется обобщение на многомерные задачи. К преимуществу нецентральных схем относят и отсутствие полуцелых индексов, что делает более простой реализацию граничных условий. Схема имеет второй порядок аппроксимации по пространственным и временным переменным.

Таким образом, граничные условия могут быть заданы через перемещения. Различают несколько типов граничных условий: свободные границы, скольжение вдоль жесткой стенки или жесткое закрепление. Неоднородности заданы в виде областей с отличающимися от основного материала упругими характеристиками (модулем упругости, коэффициентом Пуассона и плотностью).

Размер элементов в конечно-элементной модели при расчетах составлял  $10^{-3} \times 10^{-3}$  м. Расчет содержал 237 500 точек при частоте дискретизации интервалом в  $10^{-6}$  с. Расчеты выполнены для образца с упругими свойствами, которые соответствовали лабораторному образцу диаметром  $42 \times 10^{-3}$  м и длиной  $80 \times 10^{-3}$  м. С использованием построенной математической модели был выполнен анализ процессов распространения упругих волн в образце при импульсном механическом воздействии. Это позволяет получать детальные распределения параметров, описывающих поведение материала, в отличие от экспериментальных исследований, когда измеряемые величины имеют преимущественно интегральный смысл. Результаты численного моделирования визуализированы с помощью специального графического пакета.

На рис. 2 приведены результаты распространения упругого возмущения в области заданного размера содержащую трещину длиной  $10^{-2}$  м вдоль оси образца и посередине его. Распространение акустического импульса перпендикулярно трещине. Здесь наглядно показаны результаты численного моделирования изменений во времени интенсивности напряжений на такой трещине.

На рис. 3 приведены результаты численного моделирования изменения интенсивности напряжений в области образца с размерами  $(42 \times 80) \times 10^{-3}$  м<sup>2</sup> через  $30 \times 10^{-6}$  с от момента ввода детерминированного акустического импульса на середине поверхности, перпендикулярной направлению одноосного сжатия, для трещины  $10^{-2}$  м, для двух трещин  $20 \times 10^{-3}$  и  $42 \times 10^{-3}$  м вдоль оси сжатия, каждая на расстоянии  $10^{-2}$  м от краев образца, а также для нескольких трещин, расположенных вдоль оси сжатия с размерами  $(2,0; 4,0; 8,0; 16,0; 32,0; 64,0) \times 10^{-3}$  м, расстояние между трещинами  $5 \times 10^{-3}$  м. В последнем случае трещины расположены в порядке возрастания от самой маленькой по длине до самой большой от точки приложения импульса. На рис. 2 и 3 цветовой гаммой отображена интенсивность возникающих в образце напряжений. На них видно, что трещины являются концентраторами напряжений. Из области таких концентраций напряжений будет исходить электромагнитный сигнал с наибольшей амплитудой. Здесь на рис. 2 и 3 ось  $Z$  совпадает с направлением максимального главного напряжения.

При проведении экспериментов первоначально исследовалась электромагнитная эмиссия образцов горных пород скарна и магнетитовой руды разной прочности при их нагружении вдоль оси одноосным сжатием. На рис. 4 приведены усредненные за 1 с амплитуды ЭМЭ скарна в широкой полосе частот 1—100 кГц. Образец содержал кальцит и магнетит. Запись ЭМЭ проводили непрерывно с записью текущих значений сжимающих напряжений  $P$  в интервале от нулевых до разрушающих значений нагружения  $P_{\text{пред}}$ .

На рисунке отмечены этапы развития разрушения, в том числе этап развития деструкции материала образца или прорастания первичных трещин и их рост в интервале 0,3—0,52 относительной нагрузки. Относительная нагрузка является отношением текущей к разрушающей нагрузке  $P/P_{\text{пред}}$ . Подобные изменения амплитуды ЭМЭ наблюдали при развитии деструктивных процессов

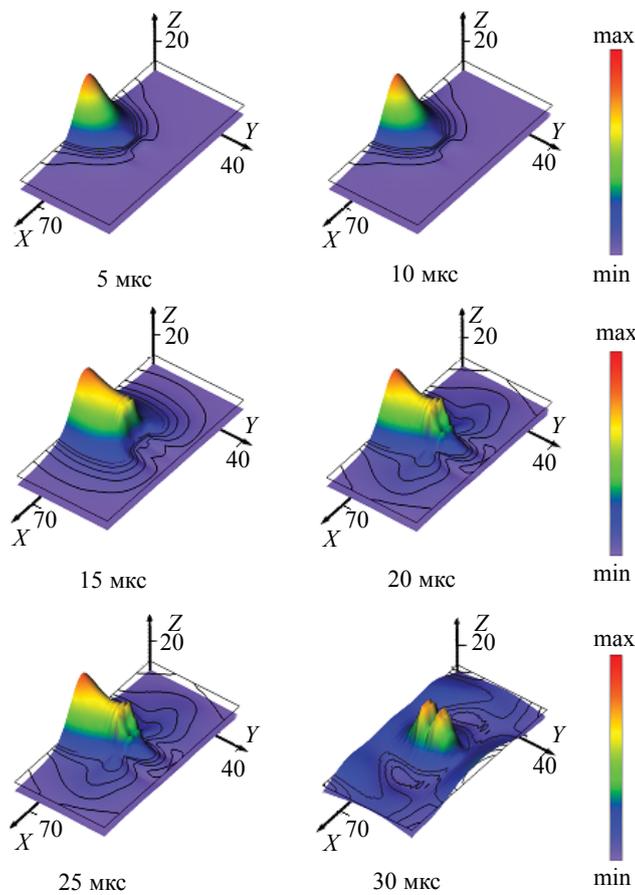
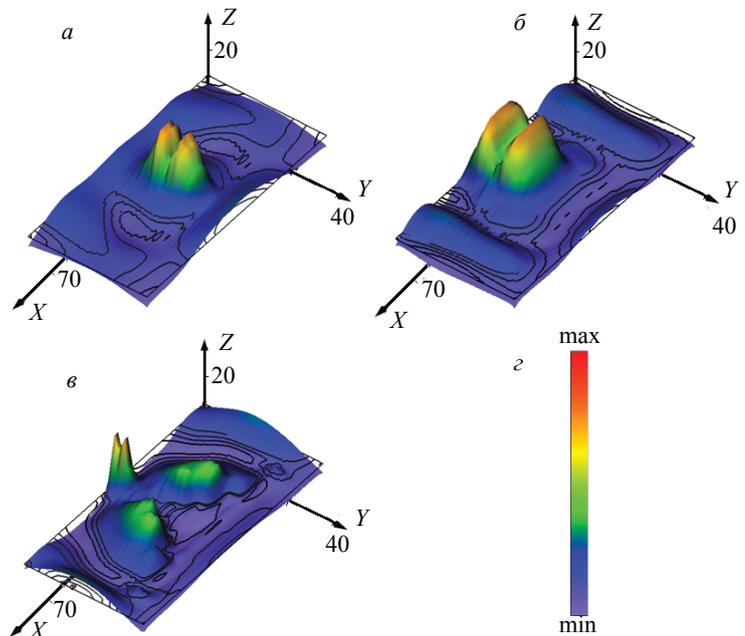


Рис. 2. Численное моделирование изменений во времени интенсивности напряжений в области разреза образца с размерами  $(42 \times 80) \times 10^{-3} \text{ м}^2$  и трещиной  $10^{-2} \text{ м}$  посередине образца вдоль направления сжатия от момента ввода детерминированного акустического импульса на середине поверхности, перпендикулярной направлению одноосного сжатия.

Рис. 3. Численное моделирование изменения интенсивности напряжений в области образца с размерами  $(42 \times 80) \times 10^{-3} \text{ м}^2$  через  $30 \times 10^{-6} \text{ с}$  от момента ввода детерминированного акустического импульса на середине поверхности, перпендикулярной направлению одноосного сжатия:  
*a* — трещина  $10^{-2} \text{ м}$ ; *б* — две трещины  $20 \times 10^{-3}$  и  $42 \times 10^{-3} \text{ м}$  вдоль оси сжатия каждая на расстоянии  $10 \times 10^{-3} \text{ м}$  от краев образца; *в* — область содержит несколько трещин, расположенных вдоль оси сжатия с размерами  $(2,0; 4,0; 8,0; 16,0; 32,0; 64,0) \times 10^{-3} \text{ м}$ , расстояние между трещинами  $5 \times 10^{-3} \text{ м}$ , трещины расположены в порядке возрастания от самой маленькой до самой большой от точки приложения импульса; *г* — цветовая гамма интенсивность напряжений.



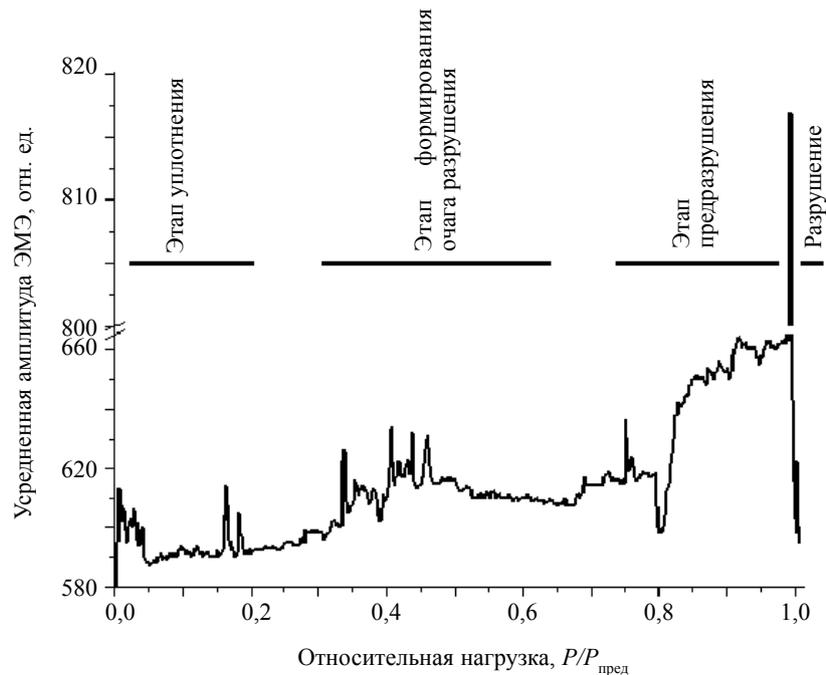


Рис. 4. Изменения усредненных за одну секунду амплитуд ЭМЭ скарна на частоте 100 кГц электромагнитных сигналов при разных значениях относительной нагрузки.

в различных упругих диэлектрических материалах и горных породах. Это обусловлено тем, что при нагружении сжимающими напряжениями хрупких материалов с твердотельными включениями усилия передаются на весь его объем, ограниченный площадью воздействия. Деформация в этом случае подчиняется закону Гука. В результате такого воздействия наиболее хрупкий материал будет разрушаться первым. Так различные модификации кальцита в зависимости от его положения и вида в горной породе имеют прочность  $(12—50) \times 10^6$  Па, в то время как прочность магнетитовой руды существенно выше. В связи с этим зона деструкции в минералах, составляющих породу, будет развиваться в разных промежутках относительной нагрузки  $P/P_{\text{пред}}$ . Это и отображено на рис. 4 при нагружении образца скарна, содержащего около 40 % кальцита и 60 % магнетита. Резюмируя результаты исследования по выявлению влияния минерального состава образцов горных пород на амплитуду ЭМЭ, можно сказать, что присутствующие в материале наименее прочные включения всегда будут первоначально подвергаться деструкции.

Экспериментально было выявлено, что структура материала может существенно влиять на амплитуду ЭМЭ. Для установления такого влияния структуры были подобраны образцы магнетитовой руды разной прочности и с разным содержанием магнетита. В табл. 1 представлены характеристики четырех исследуемых образцов с разным содержанием магнетита и пределом прочности при одноосном сжатии вдоль оси образцов, указаны максимальные амплитуды ЭМЭ на частоте 65 кГц. Видно, что при равном содержании магнетита амплитуда ЭМС в 2,4 раза выше у образца с высокой прочностью 234 против 193 кН у менее прочного. Возрастание содержания магнетита на 8—10 % существенно снижает амплитуду ЭМЭ.

На рис. 5 приведены графики изменений максимальных амплитуд спектральных составляющих электромагнитных сигналов образцов магнетитовой руды М1, М2, М3 и М4 с разным содержанием магнетита.

На рисунке видно, что образцы с относительно низкой прочностью и с пониженным содержанием магнетита М1 и М2 обладают высокими амплитудами спектральных составляющих электромагнитных сигналов на частоте 65 кГц. У более прочных образцов магнетитовой руды с повышенным содержанием магнетита М3 и М4 спектральные составляющие ЭМС на той же частоте обладают более низкими амплитудами. Эти экспериментальные результаты подтверждают, что структура материала существенно влияет на параметры ЭМЭ и ЭМС. В этом случае, несмотря на близкие усредненные значения удельного электрического сопротивления образцов  $\rho$ , существенное влияние на параметры ЭМЭ оказывает содержание магнетита в руде, так как его собственное  $\rho_{\text{маг}}$  в  $10^4—10^6$  раз меньше, чем у вмещающей его породы.

Характеристики исследуемых образцов магнетитовой руды

Образцы магнетитовой руды	Предельная прочность $P_{пред}$ , кН	Удельное электрическое сопротивление $\rho$ , Ом·м	Удельный вес $\sigma$ , $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	Содержание магнетита, %	Амплитуда ЭМС (65 кГц), В
M1	234	16	3,4	11,7±1	$800 \cdot 10^{-6}$
M2	193	17	3,4	11,7±1	$350 \cdot 10^{-6}$
M3	317	19	3,7	18,9±1	$12 \cdot 10^{-6}$
M4	258	21	3,8	21,05±1	$3 \cdot 10^{-6}$

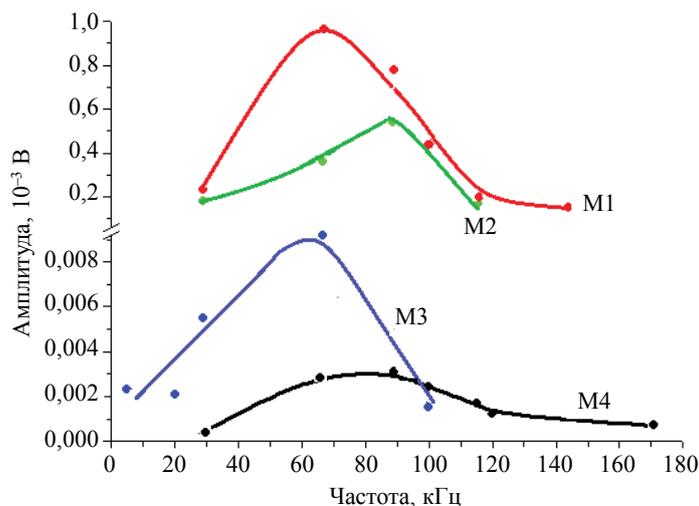


Рис. 5. Графики максимальных амплитуд спектральных составляющих электромагнитных сигналов на частоте 65 кГц образцов магнетитовой руды M1, M2, M3 и M4 с разным содержанием магнетита.

Таким образом, наличие в образцах минералов с низким удельным электрическим сопротивлением, таких как графит, магнетит, сульфиды или других веществ с подобным  $\rho$ , всегда будет сопровождаться ускоренным частичным или полным стеканием зарядов с бортов вновь образующихся трещин и их нейтрализацией. В результате изменится зарядовое состояние образца и, как следствие, уменьшатся амплитуды ЭМЭ при акустико-электрических преобразованиях как при распространении акустических импульсов от образующихся трещин, так и при внешнем акустическом воздействии.

Наряду с электромагнитной эмиссией проводились исследования параметров электромагнитных откликов на внешнее акустическое возбуждение в процесс «ступенчатого» одноосного сжатия образцов магнетитовой руды. Размеры образцов имели такие же значения, как и при исследованиях ЭМЭ. На «ступеньках» поддерживались выбранные значения нагрузки. Возбуждение на «ступеньках» производили посередине боковой поверхности образца акустическим импульсом, возникающим при ударе шариком. Акустический импульс длительностью по основанию  $50 \times 10^{-6}$  с имел форму близкую к колоколообразному распределению Гаусса.

На рис. 6 приведены закономерности изменения амплитуды электромагнитных откликов при акустико-электрических преобразованиях в условиях роста одноосного сжатия модельных образцов магнетитовой руды разной прочности. На рис. 6а, в показаны результаты исследования амплитуды акустико-электрических преобразований при внешнем детерминированном акустическом возбуждении ударом шарика на выбранных уровнях нагружения. Здесь приводятся данные для двух образцов с разными пределами прочности: рис. 6б — 250 кН, рис. 6г — 350 кН. На рис. 6б, г стрелками обозначены моменты введения детерминированного акустического воздействия ударом шарика, а непрерывной линией с полками, отображающими постоянство величин, показано «ступенчатое» нагружение при сжимающих напряжениях. Для создания одноосных сжимающих напряжений в экс-

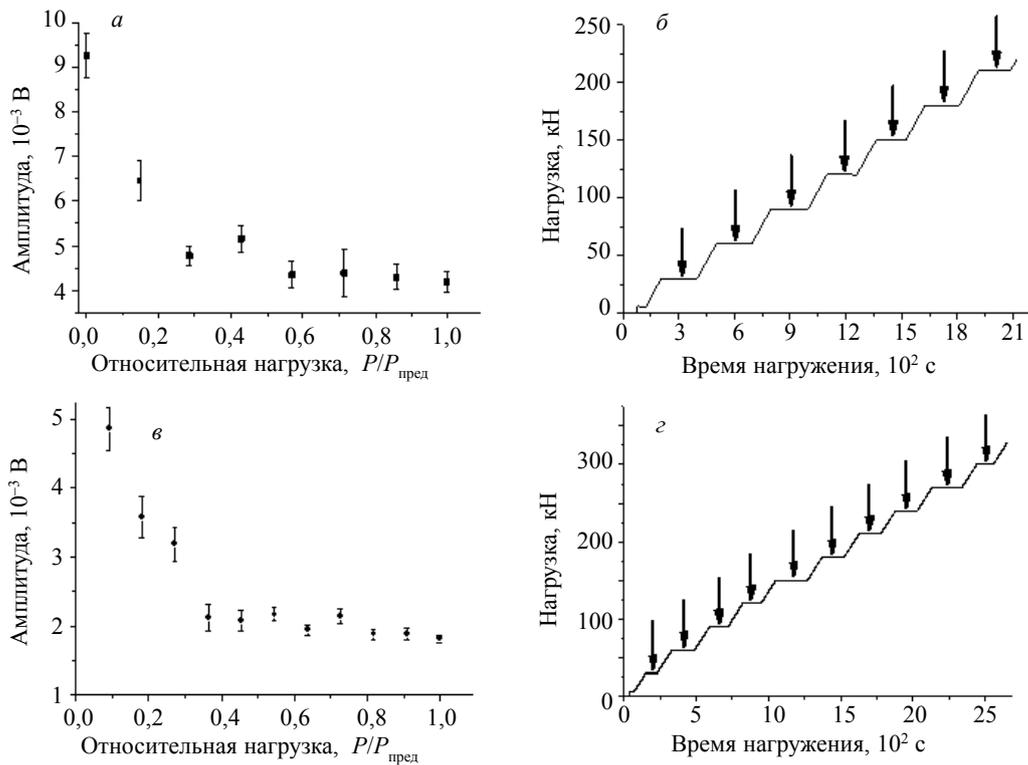


Рис. 6. Закономерности изменения амплитуды электромагнитных откликов при акустико-электрических преобразованиях в условиях роста одноосного сжатия модельных образцов магнетитовой руды разной прочности:

*a, в* — амплитуда электромагнитных сигналов; *б, з* — предельная нагрузка разрушения 250 и 350 кН соответственно; стрелками отмечены удары шариком для моделирования акустико-электрических преобразований в процессе «ступенчатого» нагружения образцов.

периментах использовали конфигурацию стенда, представленную на рис. 2а. На рис. 6а, в видно, что начало увеличения амплитуды ЭМС совпадает с началом этапа развития деструктивных процессов трещинообразования и соответствует значению 0,4 от предельной нагрузки  $P_{\text{пред}}$ , при которой произошло разрушение образца. В дальнейшем процесс развития разрушения нарастал и около 0,7 от  $P_{\text{пред}}$  начал спадать. При этом надо отметить, что для обоих образцов имеются два этапа возрастания амплитуды ЭМС. Это связано со структурой руды, которая содержит менее прочный кальцит и более прочный магнетит. В результате при внешнем акустическом возбуждении также отмечается начало этапа развития деструктивных процессов в материалах, используемых в эксперименте образцов.

Как уже указывалось выше, здесь наряду с увеличением сжимающих усилий задействовано внешнее возбуждение акустико-электрических преобразований. В результате регистрировался одиночный ЭМС, имеющий определенные амплитудно-частотные параметры. При построении закономерностей на рис. 6 использовалась только амплитуды ЭМС. На рисунках видно, что при увеличении сжимающих усилий амплитуда ЭМС падает с возрастанием на определенных участках, соответствующих этапам развития деструктивных процессов в образцах. Падение амплитуды ЭМС однозначно связано с уменьшением амплитуды возбуждающего акустического импульса [1—3]. Такое уменьшение обусловлено возрастанием потерь акустической энергии при распространении акустического импульса на вновь образующихся трещинах в зоне деструкции материала образца. С другой стороны, на бортах вновь образованных трещин присутствует еще не релаксированный заряд. В результате в зоне распространения акустического импульса ЭМС формируется на всем объеме содержащихся в образце пьезоэлектрических включений, а также зарядов на бортах трещин и поверхностях воздушных и твердотельных включений [12]. Если форма акустического импульса нарушается, то ЭМС, как интегральная характеристика, отражает это. В результате ЭМС характеризует изменения напряженно-деформированного состояния материала образца опосредовано через увеличение количества вновь образованных трещин. Если трещин нет, то амплитуда ЭМС формируется возбуждением акустическим импульсом пьезоэлектрических включений и колебанием заряженных поверхностей воздушных и твердотельных включение, а также включений в виде солевых растворов.

## ВЫВОДЫ

Анализ полученных численных расчетов и экспериментальных закономерностей амплитудных и частотных параметров электромагнитных сигналов при одноосном сжатии, а также при импульсном акустическом возбуждении диэлектрических структур в процессе развития разрушения исследуемых образцов показал, что при тестировании развития процессов разрушения методами механико-электрических и акустико-электрических преобразований можно выделить некоторые важные особенности.

Так проведенное численное моделирование изменения интенсивности напряжений в материале образцов при детерминированном акустическом возбуждении на середине поверхности, перпендикулярной направлению одноосного сжатия, выявило, что присутствующие в объеме образца трещины являются концентраторами напряжений. При разном количестве и размерах трещин, перпендикулярных распространению акустического импульса, интенсивность напряжений и их вид существенно различается. Так как параметры ЭМС связаны с характеристиками возникающих механических напряжений, то из области таких концентраций будет исходить электромагнитный сигнал с наибольшей амплитудой и с разными амплитудно-частотными спектрами.

Экспериментально полученные результаты электромагнитной эмиссии при одноосном сжатии образцов скарна и магнетитовой руды разной прочности выявили этапы подготовки разрушения образцов. Возникновение и развитие деструктивных зон находится в интервале от 0,3 до 0,52 от разрушающей нагрузки. При этом надо учесть, что для разных материалов интервал этого диапазона может изменяться в зависимости от их прочности. Показано, что при равном содержании магнетита амплитуда ЭМС в 2,4 раза выше у образца с высокой прочностью 234 против 193 кН у менее прочного. Возрастание содержания магнетита на 8—10 % существенно снижает амплитуду ЭМС. Это обстоятельство указывает на влияние структуры образцов и их диэлектрических свойств на параметры электромагнитных сигналов как при регистрации результатов механико-электрических, так и при акустико-электрических преобразованиях.

При проведении экспериментальных исследований модельных образцов магнетитовой руды разной прочности с возбуждением их на «ступеньках» нагружения детерминированными акустическими импульсами получены определенные закономерности изменения амплитуды электромагнитных откликов при акустико-электрических преобразованиях в условиях роста одноосного сжатия. Здесь так же, как и при наблюдении ЭМЭ, выделяется этап возникновения и развития деструктивных зон с последующим спадом амплитуды ЭМС.

Таким образом, по виду амплитудно-частотного спектра при детерминированном акустическом возбуждении появляется возможность определять наличие появляющихся трещин в процессе развития разрушения образца различными видами силового нагружения. Использование методов механико-электрических и акустико-электрических преобразований при силовом нагружении сжатием будет полезным при тестировании процессов начала трещинообразования и развитии процессов разрушения в твердотельных диэлектрических материалах и изделиях. В дальнейшем рассмотренные методики могут использоваться для обнаружения любых дефектов в диэлектрических материалах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 20-79-10156 (ТПУ - 19.0066.РНФ.2020).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bespalko A.A., Gol'd R.M., Yavorovich L.V., Datsko D.I.* Excitation of electromagnetic radiation in laminated rocks under acoustic influence // *Journal of Mining Science*. 2003. V. 39. No 2. P. 112—117.
2. *Bespalko A.A., Yavorovich L.V., Viitman E.E., Fedotov P.I., Shtirts V.A.* Dynamoelectric energy transfers in a rock mass under explosion load in terms of the Tashtagol mine // *Journal of Mining Science*. 2010. V. 46. No 2. P. 136—142.
3. *Fursa T.V., Dann D.D., Demikhova A.A.* On the relationship between the parameters of the electric response to pulsed mechanical exposure and the formation of cracks in concrete // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2014. V. 50. No 9. P. 548—552. <https://doi.org/10.1134/S1061830914090058>
4. *Воробьев А.А., Заводовская Е.К., Сальников В.Н.* Изменение электропроводности и радиоизлучение горных пород и минералов при физико-химических процессах в них // *ДАН СССР*. 1975. Т. 220. № 1. С. 82—85.
5. *Misra A., Gosh S.* Electromagnetic radiation characteristics during fatigue crack propagation and failure // *Appl. Phys*. 1980. V. 23. P. 387—390.
6. *Хатиашвили Н.Г.* Генерация электромагнитного излучения при прохождении акустических волн через кристаллические диэлектрики и некоторые горные породы // *ДАН СССР*. 1982. Т. 263. № 4. С. 839—842.

7. Yamada I., Masuda K., Mizutani H. Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture // *Phys. Earth Planet. Int.* 1989. V. 57. No 1—2. P. 157—168.
8. Ogawa T., Oike K., Miura T. Electromagnetic radiations from rocks // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90. P. 6245—6249.
9. Гордеев В.Ф., Малышков Ю.П., Чахлов В.Л., Баумбах Х., Каппхан Г., Словик В., Биркхольц В. Электромагнитный эмиссионный контроль прочности бетонов // *Дефектоскопия.* 1992. № 7. С. 76—80.
10. Petrenko V.F. On the nature of electrical polarization of materials caused by cracks, application to ice // *Philosophical Magazine B.* 1993. V. 67. No. 3. P. 301—315.
11. O'Keefe S.G., Thiel D.V. A mechanism for the production of electromagnetic radiation during fracture of brittle materials // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 1995. V. 89. No. 11. P. 127—135.
12. Беспалько А.А., Гольд Р.М., Яворович Л.В. Влияние электризации кальцитов на параметры электромагнитных сигналов при импульсном акустическом воздействии // *Физическая мезомеханика.* 2004. Т. 7. № 5. С. 95—99.
13. Lacidogna, G., Carpinteri A., Manuello A., G. Durin G., Schiavi A., Niccolini G., Agosto A. Acoustic and electromagnetic emissions as precursor phenomena in failure processes // *Strain.* 2010. V. 47. P. 144—152.
14. Bepal'ko A.A., Isaev Y.N., Yavorovich L.V. Transformation of acoustic pulses into electromagnetic response in stratified and damaged structures // *Journal of Mining Science.* 2016. V. 52. No. 2. P. 279—285.
15. Bepal'ko A.A., Surzhikov A.P., Dann D.D., Utsyn G.E., Petrov M.V. and Pomishin E.K. Modelling Acoustic–Electric Nondestructive Testing for Defects in Dielectric Materials // *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2021. V. 57. No. 2. P. 85—95.
16. Фурса Т.В., Уцын Г.Е., Данн Д.Д., Петров М.В. Перспективы развития неразрушающего метода контроля гетерогенных неметаллических материалов по параметрам электрического отклика на ударное воздействие // *Дефектоскопия.* 2017. № 2. С. 24—30.
17. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. М.: Высшая школа, 1977. 448 с.
18. Ashcroft N.W., Mermin N.D. *Solid State Physics.* Thomson Learning, Inc., 1976. 848 p.
19. Черепанов Г.П. Механика разрушения композиционных материалов. М.: Наука, 1983. 296 с.
20. Зеггер К. Физика полупроводников / Пер с англ. под ред. Ю. К. Пожелы. М.: Мир, 1977. 616 с.
21. Bepal'ko A., Surzhikov A., Fedotov P., Pomishin E., Stary O. Polarization and Electromagnetic Emissions of Natural Crystalline Structures upon Acoustic Excitation // *Materials Science Forum.* 2019. V. 970. P. 153—166.
22. Машков Ю.К., Кропотин О.В. Трибофизика и структурная модификация материалов трибосистем. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. 324 с.
23. Rabinovitch A., Shay A., Liraz R., Frid V., Bahat D. Electromagnetic radiation emitted during friction process // *International Journal of Fracture.* 2005. V. 131. No. 2. P. 21—27.
24. Вишневецкая Н.Л., Защинский Л.А. Расчет напряженности самосогласованного электрического поля, возникающего в диэлектрике при механическом напряжении // *Известия ВУЗов. Физика.* 1977. № 5. С. 71—74.
25. Khorsov P., Laas R., Surzhikov A.P. The Application of Reverberation in Method of Mechanoelectrical Transformations for Estimation of Stress-Strain State in Solid Dielectrical Matter // *Material Science Forum.* 2019. V. 970. P. 47—54.
26. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика) / Справочник геофизика. М.: Недра, 1976. 527 с.
27. Мооса шкала / Большая российская энциклопедия: в 35 т. Гл. ред. Ю. С. Осипов. М.: Большая российская энциклопедия, 2004—2017.
28. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика / Учеб. для вузов. М.: Недра, 1991. 368 с.
29. X-ray flat panel detector PerkinElmer XRD 0822 [Electronic resource]. Access mode: [www.perkinelmer.com](http://www.perkinelmer.com)
30. Ziman J.M. *Principles of the Theory of Solids.* Cambridge University Press, London, 1972. 435 p.
31. Давыдов А.С. Теория твердого тела. М.: Наука, 1976. 640 с.
32. *Physical Acoustics* / Edited by W.P. Mason. V. 1. New York: Academic Press, 1964. 532 p.
33. Уорминг Р.Ф., Кутлер П., Ломакс Г. Нецентральные разностные схемы II и III порядка точности для решения нелинейных уравнений гиперболического типа // *Ракетная техника и космонавтика.* 1973. Т.11. № 2. С. 76—85.
34. Бараиков В.Н., Герасимов А.В., Люкин Б.А. Прогнозирование разрушения промышленных установок // *Химическая промышленность.* 1998. № 10. С. 657—661.
35. Hoffman J. D. *Numerical methods for engineers and scientists/* Second edition revised and expanded. New York: Marcel Dekker, Inc, 2001. 840 p.
36. Hairer E., Wanner G. *Solving ordinary differential equations II: Stiff and differential-algebraic problems.* 2nd ed. Berlin, New York: Springer-Verlag, 1996.

## ПОРТАТИВНАЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА, ЕЕ ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ВАРИАНТЫ ПРИМЕНЕНИЯ

© 2021 г. С.В. Панкин<sup>1,\*</sup>, А.И. Сюрдо<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,  
Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18  
E-mail: \*pankin@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 06.08.2021; после доработки 22.09.2021  
Принята к публикации 24.09.2021

Обсуждены основные элементы разрабатываемой портативной радиометрической системы (ПРС) и варианты ее применения. При разработке детекторных модулей ПРС использованы кремниевые фотоумножители, что позволило значительно уменьшить их размеры. Подобного рода устройства и системы находят свое приложение в решении различных задач медицинской радионуклидной диагностики, требующих увеличенного поля зрения, расширенного временного диапазона исследования и мобильности. Основной целью работы был поиск оптимальной конфигурации элементов ПРС для обеспечения ее минимальных размеров и одновременно максимальной эффективности регистрации излучения с учетом особенностей исследуемых объектов и кинетики протекающих в них процессов. Кроме того, дополнительно рассмотрен алгоритм подбора минимально необходимого для каждого исследования количества активности радиоактивного препарата.

*Ключевые слова:* портативный радиометр, гамма-излучение, радиофармпрепарат, сцинтиграфия, кремниевый фотоумножитель.

**DOI:** 10.31857/S0130308221100067

### ВВЕДЕНИЕ

Наиболее сложной из применяемых сейчас систем для проведения радионуклидной диагностики является однофотонный эмиссионный компьютерный томограф (ОФЭКТ) [1]. Основным ограничением ОФЭКТ является небольшое поле зрения его детекторной подсистемы, как правило, не превышающее  $400 \times 500$  мм<sup>2</sup>, что существенно ограничивает возможности анализа пространственного распределения введенного радиофармпрепарата (РФП), а также динамики его перемещения в объекте исследования [2]. ОФЭКТ также обладает большими размерами и массой, что предполагает его размещение только в специально оборудованных помещениях, а, следовательно, проведение диагностирования пациентов в стационарных условиях. В современном неразрушающем контроле и медицине возникает все больше диагностических задач, для решения которых требуется увеличенное поле зрения, высокое пространственное и временное разрешение, расширенный временной диапазон исследования как в области малых, так и больших времен, а также мобильность, что не могут пока предоставить современные томографические системы. Одним из вариантов решения такого рода задач может быть использование систем с несколькими миниатюрными детекторными модулями, установленными в удаленных друг от друга зонах [3].

Портативные медицинские радиометры на основе кремниевых фотоумножителей обладают рядом преимуществ в сравнении с аналогичными, но с применением вакуумных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). В иностранной литературе [4] кремниевые фотоумножители обозначаются как Silicon Photomultiplier или SiPM. Детекторные модули радиометров с SiPM имеют существенно меньшие габариты и сниженные требования к источникам питания [5]. Портативная радиометрическая система (ПРС), разработанная совместно специалистами кафедры экспериментальной физики УрФУ и лаборатории интеллектуальных систем диагностики ИФМ УрО РАН, предназначена для реализации исследований радионуклидной диагностики в нескольких режимах: гаммазондирование, 2D-сканирование и динамическая сцинтиграфия [6, 7]. Наиболее значимыми преимуществами разработанной ПРС являются более высокая эффективность регистрации излучения и возможность максимально близкого подведения ее миниатюрных детекторных модулей в индивидуальных проекциях по отношению к объекту исследования [4]. Поэтому для демонстрации преимуществ ПРС в сравнении с современными томографическими системами важно рассмотреть варианты применения ПРС для исследования объектов малого размера, расположенных вблизи органов и тканей с повышенной чувствительностью к воздействию ионизирующего излучения, например глаза. В этой связи необходимо также описать логику выбора основных элементов ПРС с учетом требований к применяемому в медицине радиометрическому оборудованию и предло-

жить алгоритм подбора оптимального количества активности вводимого препарата, учитывающий свойства детекторных модулей, индивидуальные параметры их коллиматоров и требования к величине временного окна при динамическом исследовании.

Поэтому целью работы были выбор оптимальной конфигурации ПРС для обеспечения минимальности размеров ее детекторных модулей и в то же время максимально возможной их эффективности регистрации излучения с учетом особенностей исследуемых объектов и кинетики протекающих в них процессов, а также разработка алгоритма расчета соответствующего выбранной методике значения активности вводимого препарата.

### ПОРТАТИВНАЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА, ЛОГИКА ВЫБОРА ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

ПРС разрабатывалась как многофункциональный медицинский радиометр для проведения радионуклидных исследований кинетики накопления и выведения радиофармпрепарата, а также его распределения в объекте исследования. Одним из важнейших условий, поставленных при разработке было соблюдение баланса между качественными характеристиками детекторного модуля и его габаритами [6]. ПРС включает 4 детекторных модуля гамма-излучения (рис. 1, поз.  $I^1$ ,  $I^2$ ,  $I^3$ ,  $I^4$ ), оснащенных набором сменных коллиматоров (поз. 2), которые позволяют с необходимым пространственным разрешением эффективно регистрировать накопление РФП в интересующих зонах. Каждый детекторный модуль ПРС состоит из нескольких элементов: сцинтилляционный кристалл CsI-Tl (поз. 3), кремниевый фотоумножитель типа SiPM (поз. 4), предусилитель сигнала (поз. 5) и герметично вмонтированный в корпус разъем (поз. 6). Блок обработки сигнала (поз. 7) и персональный компьютер (поз. 8) обеспечивают управление процессами измерения, сбора, обработки и анализа получаемых данных [7].

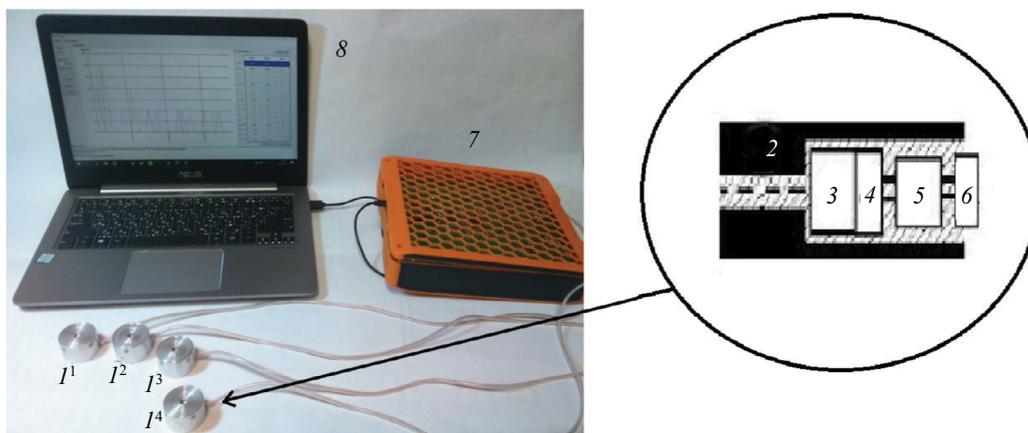


Рис. 1. Общий вид портативной радиометрической системы и структура детекторного модуля (вставка):  $I^1$ ,  $I^2$ ,  $I^3$ ,  $I^4$  — детекторные модули ПРС; 2 — коллиматор; 3 — сцинтилляционный кристалл; 4 — SiPM; 5 — предусилитель; 6 — разъем; 7 — блок обработки сигнала; 8 — персональный компьютер.

Выбор основных элементов детекторного модуля ПРС во многом связан с необходимостью достижения максимальной эффективности регистрации гамма-излучения, характеризующей число зарегистрированных детекторным модулем фотонов относительно числа падающих. Так, эффективность регистрации излучения в значительной степени зависит от выбора материала и размеров сцинтилляционного кристалла, типа SiPM и параметров коллиматора. Кроме того, большую роль играют значения энергий гамма-излучения у используемых при диагностике изотопных источников. При разработке детекторного модуля предполагалось, что ПРС будет использоваться преимущественно с наиболее часто применяемым при длительных динамических радионуклидных исследованиях радиофармпрепаратом на основе изотопа  $Tc^{99m}$ . Эффективная энергия гамма-квантов у  $Tc^{99m}$  составляет 140 кэВ. Сама процедура выбора сцинтилляционного кристалла, кремниевого фотоумножителя и расчета параметров коллиматоров описана в [8, 9].

## АЛГОРИТМ ПОДБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ВВОДИМОЙ АКТИВНОСТИ В СООТВЕТСТВИИ С ПАРАМЕТРАМИ ВЫБРАННОГО КОЛЛИМАТОРА

В качестве примера рассмотрен случай исследования состояния слезной железы, обладающей крайне малыми размерами и низкой функциональной активностью, что делает практически невозможным исследование ее выделительной функции в динамическом режиме с применением ОФЭКТ [10, 11]. При исследовании слезной железы томографическая установка дает возможность лишь оценить в статике объем функционально активной ткани. В связи с этим, как один из наиболее перспективных вариантов применения ПРС, была выбрана радионуклидная диагностика подсистем зрительного аппарата и, в частности, слезопроизводящей системы.

Эффективность функционирования желез может быть оценена из данных радионуклидного исследования [12]. Из них также можно определить такой диагностически важный параметр как секреторно-экскреторный коэффициент (СЭК). Он рассчитывается как отношение интенсивностей излучения в области исследуемой железы при накоплении радиофармпрепарата в ее тканях до  $I_{\max}$  и после стимуляции лимонным соком  $I_{\min}$ :

$$\text{СЭК} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Здесь уместно отметить, что прямое исследование кинетики перемещения жидких радиоактивных источников в малых объектах остается актуальной и во многих случаях нерешенной задачей [13]. Более того, такого рода задачи возникают не только в медицинской, но и в технической и технологической диагностике, например, при контроле различных радиаторных систем, используемых в радиационно-технологических процессах [14]. Поэтому для указанных целей крайне важно подобрать правильное соотношение между эффективностью регистрации и пространственным разрешением детектирующей подсистемы. Оно определяется выбором параметров коллиматора — устройства, ограничивающего распространение излучения, исходящего из определенной области до пучка с заданным телесным углом. Одновременно коллиматор защищает детектирующую часть от рассеянного излучения [15]. Согласно [15], количество регистрируемых в единицу времени гамма-квантов  $I$  детекторным модулем с коллиматором определяется как

$$I = G \cdot D \cdot h, \quad (2)$$

где  $G$  — геометрическая эффективность коллиматора, определяемая как площадь поля его зрения на поверхности протяженного источника излучения;  $D$  — активность источника, нормированная на видимую коллиматором, площадь и определяемая в направлении центральной оси коллиматора;  $h$  — суммарная эффективность регистрации излучения сцинтиллятором и ФЭУ.

Для более полной характеристики указанных параметров, влияющих на эффективность регистрации гамма-квантов детекторным модулем, и их взаимосвязи с другими параметрами радионуклидной диагностики необходимо отметить следующее. Значение  $D$  определяется количеством введенного радиофармпрепарата, а также особенностями его распределения и накопления в исследуемом объекте. В соответствии с [16] полезный эффект от проведенной радионуклидной диагностики должен быть значительно больше, чем вред, нанесенный при введении радиофармпрепарата. Следовательно, количество вводимой активности должно быть минимальным, но, с другой стороны, достаточным для получения статистически достоверной информации. Указанная выше геометрическая эффективность  $G$  характеризует геометрические параметры коллиматора. Повышение величины  $G$  за счет, например, увеличения радиуса входного отверстия коллиматора приведет к ухудшению пространственного разрешения детекторного модуля [15].

Анализируя все выше рассмотренные особенности ПРС и выбранной методики, может быть определена минимально необходимая активность вводимого радиофармпрепарата. В норме значения СЭК для слюнной околоушной и слюнной подчелюстной желез находятся в диапазоне 43—47 % [17]. Для достоверного определения нахождения значения СЭК в диапазоне указанных нормальных значений желательнее обеспечить точность измерения СЭК не ниже, чем  $(47 \% - 43 \%) / 3 = 1,3 \%$ . Тогда допустимая относительная ошибка при определении СЭК не будет превышать  $E = 1,3 \% / 43\% = 0,03$ , а величины  $I_{\max}$  и  $I_{\max} - I_{\min}$ , входящие в выражение (1) для СЭК, будут связаны с ней следующим образом:

$$E = \text{MaxError}\{\text{СЭК}\} / \text{СЭК},$$

где  $\text{MaxError}\{\text{СЭК}\}$  — максимально допустимая абсолютная ошибка определения для СЭК.  $\text{MaxError}\{\text{СЭК}\}$  также может быть определена как корень из суммы квадратов произведений частных производных выражения (1) и отклонений от истинных значений  $\Delta I$  при определении  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$ :

$$\text{MaxError}\{\text{СЭК}\}/100 = \sqrt{\left(\frac{\partial\left\{\frac{I_{\max}-I_{\min}}{I_{\max}}\right\}\Delta I}{\partial I_{\min}}\right)^2 + \left(\frac{\partial\left\{\frac{I_{\max}-I_{\min}}{I_{\max}}\right\}\Delta I}{\partial I_{\max}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{I_{\min}\cdot\Delta I}{I_{\max}^2}\right)^2}. \quad (3)$$

Ошибка измерения интенсивности излучения  $\Delta I$  детекторным модулем ПРС может быть оценена из выражения для ошибки определения интенсивности излучения, выражаемой через коэффициент Стьюдента  $t_{\text{cr}}$  и среднеквадратичное отклонение  $\sigma$ :  $\Delta I = \sigma \cdot t_{\text{cr}}$ . С учетом вышеуказанных условий, поскольку СЭК определяется при анализе лишь одного пика кинетической кривой, то количество измерений  $n$  будет равно 2, а достаточная вероятность нахождения полученного значения в заданном диапазоне ошибки  $P = 0,95$ . При указанных  $n = 2$  и  $P = 0,95$  коэффициент Стьюдента равен 12. Значение среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  определено во время тестирования ПРС и для  $\Delta t = 30$  с составило 3,5 имп/с [10]. В итоге можно рассчитать значение  $\Delta I$ , которое равняется 42 имп/с.

Если преобразовать выражение (1) к виду:

$$I_{\min} = (1 - \text{СЭК}/100) I_{\max},$$

то станет видно, что наименьшее значение  $I_{\min}$  будет получаться при максимальном значении СЭК ~47 %. Тогда доля препарата при СЭК=47 %, остающаяся в железе после стимуляции слюновыделения, составит  $100 \% - 47 \% = 53 \%$ .

Из выражения (3) можно выразить  $I_{\max}$ :

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{\left(1 + (1 - \{\text{СЭК}/100\})^2\right) \cdot \Delta I^2}{(\text{MaxError}\{\text{СЭК}\}/100)^2}}. \quad (4)$$

Зная требования к точности определения СЭК, а именно  $\text{MaxError}\{\text{СЭК}\}=1,3 \%$ , а также значение  $\Delta I = 42$  имп/с и максимально возможное значение СЭК = 47 %, можно оценить  $I_{\max}$ . Таким образом, минимально необходимое для обеспечения требуемой точности определения СЭК значение интенсивности излучения  $I_{\max}$  должно быть не менее 3400 имп/с.

Используя вычисленное  $I_{\max}$  и выражение (2), можно оценить минимально необходимую активность  $A_{\min}$ . Так как в выражении (2)  $D$  — это активность плоского источника [15], равная  $A/S$ , то:

$$A_{\min} = \frac{I \cdot S}{G \cdot h} = \frac{I_{\max} \cdot S}{G \cdot h}.$$

Величина  $A_{\min}$  будет именно минимальной необходимой, поскольку при ее меньшем значении невозможно будет достоверно различить максимумы и минимумы на зависимостях изменения интенсивности излучения от времени в тканях железы.

### ТЕСТИРОВАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОГО АЛГОРИТМА НА СПЕЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ СЛЕЗНЫХ И СЛЮННЫХ ЖЕЛЕЗ

Общий вид разработанного для тестирования предложенных алгоритмов работы с ПРС фантома слезных и слюнных желез представлен на рис. 2 [12]. Он создан на основе проточной конструкции с заполняемыми жидкостью капсулами. Детекторные модули ПРС (поз. 1', 1'', 1''') размещаются вблизи моделируемых слезных (2) и слюнных (3), (4) желез (см. рис. 2). Поток раствора радиофармпрепарата нагнетается в систему силиконовых трубок с внутренним диаметром 3 мм из специальных контейнеров (поз. 5, 6, 7). Сток от каждой из желез направляется с выхода капсул в общий контейнер (поз. 8) с помощью таких же силиконовых трубок, как и на их входе. Серия фантомных экспериментов проведена в соответствии со следующим алгоритмом. После установки

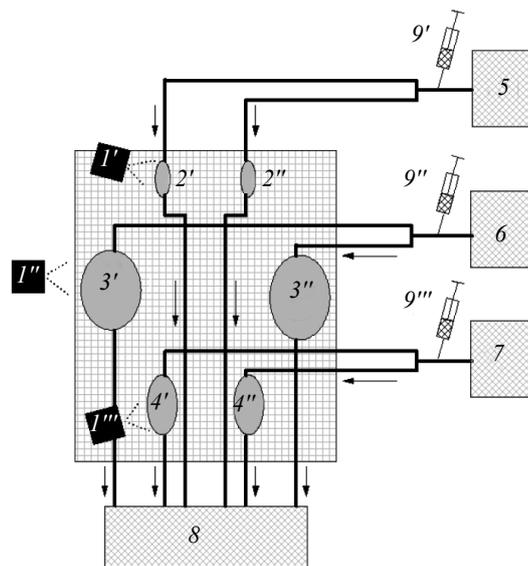


Рис. 2. Блок-схема фантома слезопроизводящей системы:

$1', 1'', 1'''$  — детекторные модули ПРС;  $2', 3', 4', 2'', 3'', 4''$  — капсулы, имитирующие железы слезные и слюнные железы;  $5, 6, 7$  — контейнеры с радиофармпрепаратом;  $8$  — общий контейнер стока;  $9', 9'', 9'''$  — шприцы с дистиллированной водой.

детекторных модулей ПРС вблизи капсул, имитирующих слезные и слюнные железы, фантом помещался в поле зрения детекторной подсистемы. В капсулы, имитирующие железы, подавался раствор радиофармпрепарата. В результате, после полного заполнения каждой капсулы-имитатора активность радиофармпрепарата в каждой из них соответствовала требуемому значению, ранее рассчитанному для ПРС.

Одной из задач тестирования ПРС и предложенных методик была проверка достаточности расчетно-оцененной активности вводимого радиофармпрепарата для проведения радионуклидных исследований слезных и слюнных желез со стандартным временным окном  $\Delta t = 30$  с. Для сравнительных ОФЭКТ-исследований выбиралось стандартное расстояние между детекторной подсистемой и фантомом, равное 50 мм [12]. Для ОФЭКТ-системы был выбран многоканальный низкоэнергетический коллиматор высокого разрешения LEHR, имеющий сонаправленное расположение цилиндрических каналов и позволяющий получить при указанном расстоянии 50 мм требуемое значение  $\delta = 10$  мм.

На рис. 3 показаны временные зависимости изменения интенсивности излучения в околоушной (кривая 1) и подчелюстной (кривая 2) слюнных железах, а также в слезной железе (кривая 3).

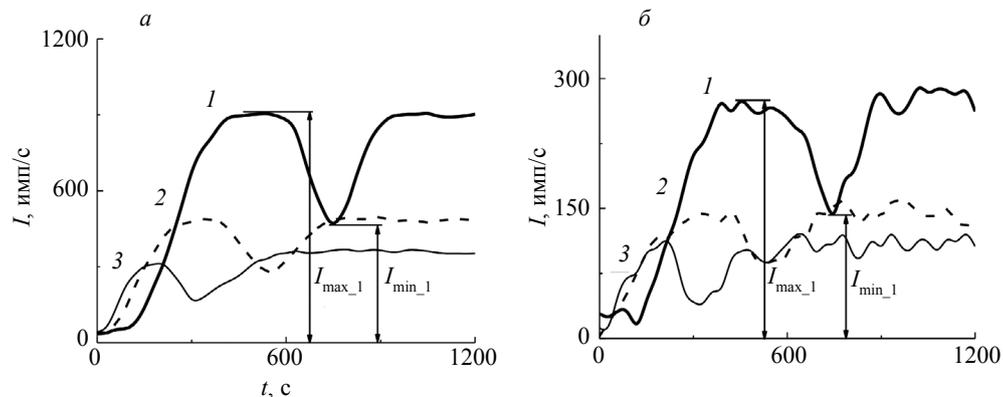


Рис. 3. Зависимости изменения интенсивности излучения от времени в околоушной слюнной (кривая 1), подчелюстной слюнной (кривая 2) и слезной (кривая 3) железах при их регистрации с использованием ПРС (а) и ОФЭКТ (б).

Для примера, на кривой  $I$ , связанной с перемещением радиофармпрепарата в слюнной околоушной железе, определены значения  $I_{\min,1}$  и  $I_{\max,1}$ . В результате проведенных с использованием выражения (1) расчетов были получены средние значения секреторно-эксекреторных коэффициентов СЭК<sub>1</sub>, СЭК<sub>2</sub> и СЭК<sub>3</sub> для каждой из вышеуказанных желез, а также значения ошибки их вычисления относительно истинного соответственно  $E_1, E_2, E_3$ . Значения СЭК<sub>1</sub> и соответствующие значения  $E_1$ , вычисленные из ПРС-данных, не превышают требуемых [17] и составляют: СЭК<sub>1</sub> = 48,1±0,5 %,  $E_1 = 0,02$  при  $P = 0,95, n = 10$ ; СЭК<sub>2</sub> = 43,1±0,4%,  $E_2 = 0,02$  при  $P = 0,95, n = 10$ , СЭК<sub>3</sub> = 44,9±0,5 %,  $E_3 = 0,02$  при  $P = 0,95, n = 10$ . Важно, что  $E_i = 0,02$  не превысило максимально допустимый уровень ошибки определения СЭК  $E_{\max} = 0,03$ , а результаты тестирования ПРС подтвердили возможность точного определения СЭК<sub>3</sub>, обычно не вычисляемого при проведении исследований с применением ОФЭКТ из-за малых размеров и слабой функциональной активности слезных желез на фоне окружающих тканей.

Параметры СЭК, полученные из ОФЭКТ-данных, были определены со значительно большими погрешностями, и все значения  $E_i$  превысили допустимое  $E_{\text{доп}}, E_i \geq E_{\text{доп}} = 0,03$ : СЭК<sub>1</sub> = 46,2±3,2 %,  $E_1 = 0,07$  при  $P = 0,95, n = 10$ ; СЭК<sub>2</sub> = 42±4,2 %,  $E_2 = 0,10$  при  $P = 0,95, n = 10$ ; СЭК<sub>3</sub> = 45,7±6,8 %,  $E_3 = 0,15$  при  $P = 0,95, n = 10$ . Одной из основных причин больших погрешностей в ОФЭКТ-исследованиях является недостаточность вводимой активности радиофармпрепарата, которая была оптимальной для ПРС-опытов.

Таким образом, результаты фантомных экспериментов показали, что при исследованиях слезных и слюнных желез, ПРС имеет в сравнении с ОФЭКТ-системами ряд преимуществ. Наиболее важным результатом является то, что использование ПРС позволяет не только получать уникальную информацию, но и снижать дозовую нагрузку, а также себестоимость подобных диагностических процедур. Более того, преимущество в эффективности регистрации ПРС может быть использовано как для уменьшения активности вводимого радиофармпрепарата, так и для повышения временного разрешения с сохранением требуемой статистики счета. Кроме того, фантомное тестирование с применением ПРС выявило возможность уточненного описания участков кинетических кривых, соответствующих снижению и увеличению количества радиофармпрепарата в железе. В перспективе, указанное преимущество может быть использовано для разработки методик углубленной оценки динамики накопления и выведения радиофармпрепарата и характеристики функции слезных и слюнных желез, а также выявления влияния различных внешних раздражающих факторов.

## ВЫВОДЫ

В работе рассмотрена и обоснована логика выбора элементов портативной радиометрической системы. Благодаря использованию твердотельных фотоумножителей в сочетании со сцинтилляционными кристаллами CsI(Tl), детекторные модули портативной радиометрической системы обладают уменьшенными размерами и оптимальной эффективностью регистрации гамма-излучения от источника на основе  $Tc^{99m}$ . Выбранная конфигурация позволяет в ряде случаев достигать улучшенного в сравнении с однофотонными эмиссионными компьютерными томографами диагностического результата. Предложенный алгоритм применения портативной радиометрической системы для оценки секреторно эксекреторного коэффициента слезной железы, разработан с учетом ее преимуществ перед применяемыми аналогичными системами. В частности, значение активности вводимого радиофармпрепарата может быть подобрано таким образом, чтобы дозовая нагрузка на пациента была минимальна без снижения точности определения секреторно эксекреторного коэффициента. Важно также отметить, что кроме основного медицинского назначения разработанная система может найти применение в промышленности для неразрушающего контроля проходимости капиллярных трубок, контроля герметичности клапанов и т.п.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Экспертиза», № АААА-А19-119062590007-2) при частичной поддержке РФФИ (проект № 20-48-660045).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tsui B.M. Quantitative single-photon emission computed tomography: Basics and clinical considerations // Semin. Nucl. Med. 1994. No. 24. P. 38—65.
2. Bailey D.L., Humm J.L. Nuclear Medicine Physics / A Handbook for Teachers and Students. Vienna: International atomic energy agency, 2014. P. 736.

3. *Mahadev V.* Measurement of Effective Renal Plasma Flow: Evaluation of Clinical Uses in Combination with Renography / Dynamic Studies with Radioisotopes in Medicine. Proceedings of the Symposium on Dynamics Studies with Radioisotopes in Clinical Medicine and Research International Atomic Energy Agency. 1971. P. 299—320.
4. *Громыко М.В., Крымов А.Л., Игнатьев О.В.* Сцинтилляционный  $\beta$ -радиометр: особенности применения и выбор детектора / Физика. Технологии. Инновации. Сборник научных трудов. № 4. С. 47—53.
5. *Prekeges J.* Nuclear Medicine Instrumentation. Washington: Jones & Bartlett Publishers, 2012. P. 550.
6. Патент на полезную модель №185203 Российская Федерация, RU 185203 U1. Детектирующий модуль гамма-излучения [Текст] / Панкин С.В., Мильман И.И., Сарычев М.Н., Зеленин А.А.; заявитель и патентообладатель ООО «Стагирит Медицинские Инновации» — № 2018121357; приор. 08.06.2018, опубл. 26.11.2018.
7. *Панкин С.В., Сурдо А.И.* Портативная радиометрическая система для радионуклидной диагностики // АНРИ. 2018. № 2. С. 40—47.
8. *Панкин С.В.* Портативная радиометрическая система для медицинской радионуклидной диагностики: структура и основные возможности применения // Биомедицинская радиоэлектроника. 2021. № 2. С. 47—55.
9. *Pankin S.V., Surdo A.I.* A portable radiometric system for nuclear medicine // Radiation Measurements. 2019. P. 10—12.
10. *Barna S., Garai I.* Clinical utility of SPECT/CT and CT-dacryocystography-enhanced dacryoscintigraphy in the imaging of lacrimal drainage system obstruction // Ann. Nucl. Med. 2019. P. 746—754.
11. *Chen S., Wang Y.* Virtual Touch Quantification of the Salivary Glands for Diagnosis of Primary Sjögren Syndrome // J. Ultrasound Med. 2016. P. 2607—2613.
12. *Pankin S.V., Surdo A.I.* A phantom model of the lacrimal and salivary glandular structures // AIP Conference Proceedings. 2019. V. 2174. No. 020152.
13. *Kumar Sanjay, Mahto Dalgobind.* Recent Trends in Industrial and Other Engineering Applications of Non Destructive Testing: A Review // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2013. V. 4. P. 13.
14. *Baldev Raj, Jayakumar T.* Practical Non-destructive Testing. Woodhead Publishing, 2002. P. 184.
15. *Beck R.N.* Collimators for radioisotope scanning systems — medical radioisotope scanning. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1964. P. 211—232.
16. Постановление главного государственного санитарного врача российской федерации от 20 июля 2015 г. N 31: [Об утверждении СанПиН 2.6.1.3288-15 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при подготовке и проведении позитронной эмиссионной томографии»]. М: ЦЕНТРМАГ. С. 90.
17. *Лущманов Ю.Б., Чернов В.И.* Радионуклидная диагностика для практических врачей. Томск: STT, 2004. С. 294.

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ОБЪЕКТА МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОЙ ЦИФРОВОЙ КОМПТОНОВСКОЙ РАДИОГРАФИИ

© 2021 г. С.П. Осипов<sup>1,\*</sup>, Е.Ю. Усачев<sup>2</sup>, С.В. Чахлов<sup>1,\*\*</sup>, О.С. Осипов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия 634028 Томск, пр-т Ленина, 30

<sup>2</sup>МИРЭА — Российский технологический университет, Россия 119454 Москва, пр. Вернадского, 78

<sup>3</sup>Medialooks, Россия 236016 Калининград, ул. Александра Невского, 59

E-mail: \*osip1809@rambler.ru; \*\*chakhlov@tpu.ru

Поступила в редакцию 13.09.2021; после доработки 24.09.2021

Принята к публикации 24.09.2021

Предложена имитационная модель исследования структуры объекта методом послойной цифровой комптоновской радиографии (томографии). Разработанная модель учитывает геометрическую схему контроля, параметры источника и блока регистрации гамма-излучения, оснащенного специальной системой коллиматоров. Имитационная модель способа реализована в виде программы в системе MathCad. Возможности имитационной модели и соответствующей программы продемонстрированы для алюминиевого барьера со сферическими локальными включениями.

*Ключевые слова:* геометрия одностороннего доступа, гамма-излучение, цифровая комптоновская радиография, комптоновская томография, распределение плотности, внутренняя структура.

DOI: 10.31857/S0130308221100079

### ВВЕДЕНИЕ

Существует значимое ограничение, касающееся классических (трансмиссионных) реализаций цифровой радиографии (ЦР) и компьютерной томографии (КТ). Это ограничение касается взаимного пространственного расположения источника рентгеновского (гамма-, тормозного) излучения, далее источника излучения (ИИ), регистратора излучения (РИ) и объекта контроля (ОК). В трансмиссионных реализациях ЦР и КТ источник и регистратор излучения располагаются с противоположных сторон объекта контроля [1—6]. Такая модель геометрии контроля называется геометрией двустороннего доступа. Для многих технических объектов геометрия двустороннего доступа является нереализуемой. К подобным объектам относятся [7—10], например, крупногабаритные изделия с внутренними полостями с необходимостью контроля изнутри или изделия с толщиной, превышающей проникающую способность излучения по материалу изделия, с необходимостью контроля приповерхностных зон. Актуальность совершенствования и разработки методов и средств ЦР и КТ, основанных на анализе полей рассеянных фотонов, не вызывает сомнений. Среди различных реализаций упомянутых методов и систем выделяется послойная комптоновская радиография [11]. В работе [7] отмечается недостаточная эффективность подхода [11] к формированию комптоновских изображений слоев испытуемого объекта с помощью камеры обскуры. Совершенствование детекторов и систем коллиматоров первичного и вторичного излучения, а также развитие алгоритмов обработки полученной информации, существенно снижают роль отмеченного недостатка и переводят метод послойной цифровой комптоновской радиографии (ПЦКР) на более высокий уровень [12]. При проектировании систем ПЦКР возникает ряд сложностей, связанных с проверкой принципа технической реализуемости применительно к конкретной задаче проектирования. Здесь под конкретной задачей проектирования понимается совокупность требований, ограничений и ожиданий, сформулированных заказчиком или конечным потребителем проектируемых диагностических и измерительных систем. Проверка принципа технической реализуемости сводится к обоснованию технической возможности, то есть развернутому ответу на вопрос о существовании источников и регистраторов фотонного излучения, механических систем перемещения, объединение которых в единый комплекс позволит осуществлять исследование объектов с заданным уровнем качества. Качество трансмиссионных систем ЦР и КТ определяет ряд параметров, среди которых выделяют радиационную чувствительность (радиационный контраст), пространственное разрешение, вероятность обнаружения заданной неоднородности (дефекта, локального включения), точность измерения параметров объекта контроля, производительность контроля и т.п. Для систем ПЦКР, помимо оценки отмеченных выше параметров, следует ответить на вопрос об изменении этих параметров по глубине интересующего потребителя слоя (сечения).

Выбор элементов систем ПЦКР и оценка отмеченных выше параметров экспериментальным путем является затратным и не гарантирует решение задачи проектирования. В настоящее время имитационное моделирование становится базовым методом для обоснования возможности проектирования систем ЦР, КТ и комптоновской радиографии [13—15]. Необходимо разработать имитационную модель и программу, ее реализующую, для рассматриваемого типа систем.

## 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ПОСЛОЙНОЙ ЦИФРОВОЙ КОМПТОНОВСКОЙ РАДИОГРАФИИ

Математическую модель формирования исходных изображений в ПЦКР определяет геометрическая схема сканирования объекта контроля. Для формирования искомых изображений будем придерживаться схемы сканирования, близкой к схеме из работы [8]. Ниже приведем ее краткое описание.

### 1.1. Геометрическая схема сканирования объекта контроля в цифровой комптоновской радиографии

Геометрическая схема сканирования объекта контроля в ПЦКР должна отвечать ряду требований, связанных с обеспечением требований заказчика, сформулированных в техническом задании на проектирование. Одним из основных требований является высокая производительность контроля, то есть интегральное время, затрачиваемое на формирование всей необходимой совокупности исходных изображений в ПЦКР. Очевидно, что максимальная производительность достигается в случае формирования всех необходимых исходных изображений за одно сканирование.

На рис. 1 приведена геометрическая схема сканирования ОК в ПЦКР. Система ПЦКР состоит из следующих основных технических и «виртуальных» элементов:

- источника фотонного излучения 1, в качестве которого могут быть использованы  $\gamma$ -радионуклиды, рентгеновские аппараты, ускорители электронов;
- щелевого коллиматора источника фотонов 2;
- специальным образом организованного коллиматора 3 регистратора фотонного излучения 4;
- механизма перемещения 5 объекта контроля 6 относительно фиксированных источника 1 и регистратора фотонного излучения 4 с системой коллиматоров 3;
- части пространства  $\mathcal{R}^3$ , ограничиваемого плоскостями 7 и 8 и «просматриваемого» коллиматорами регистратора;
- исследуемой области объекта контроля 9, которую можно считать источником вторичного фотонного излучения.

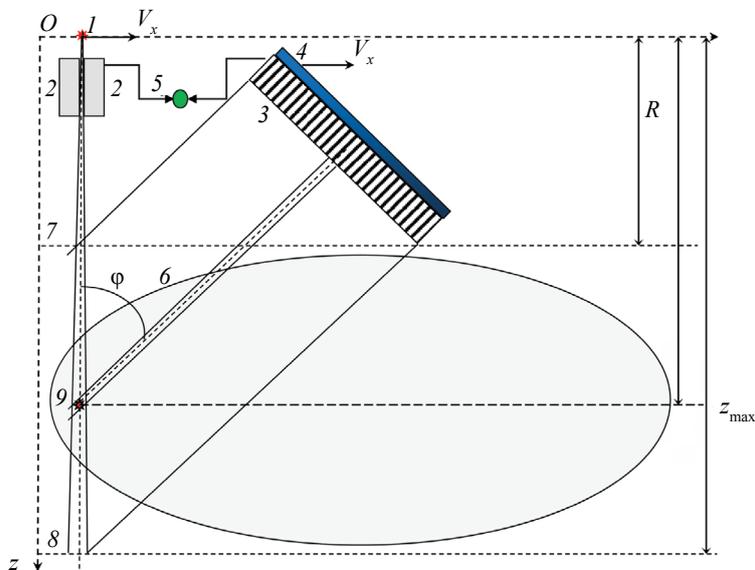


Рис. 1. Схема сканирования объекта контроля в комптоновской цифровой радиографии:

1 — источник фотонного излучения; 2 — щелевой коллиматор источника фотонов; 3 — коллиматор регистратора фотонов; 4 — регистратор фотонного излучения; 5 — механизм перемещения; 6 — объект контроля; 7, 8 — плоскости, ограничивающие часть пространства, «просматриваемого» коллиматорами регистратора; 9 — источник вторичного фотонного излучения.

Отметим, что контролируемая область объекта контроля может отличаться от всего объема ОК. Классическим примером такой ситуации является задача оценки внутренней структуры приповерхностного слоя объекта контроля [10, 16], находящегося в наиболее неблагоприятных условиях эксплуатации.

Для повышения производительности сканирования в проектируемых приборах, предназначенных для оценки внутренней структуры методом ПЦКР, в качестве регистраторов фотонного излучения используют панельные или матричные многоканальные детекторы [17, 18]. При ненадлежащей частоте опроса детекторов (времени формирования цифрового сигнала (ЦС) с единичного детектора регистратора излучения) при сканировании в ОК в направлении  $OX$  в формируемых изображениях могут наблюдаться «мертвые» зоны. Пусть коллиматоры регистратора имеют отверстия с квадратным сечением  $a \times a$ . Для толщины коллиматора  $l$  должно соблюдаться ограничение  $l \gg a$ . Для исключения (смягчения) влияния мертвых зон на качество контроля должно соблюдаться следующее условие:

$$V_x t < a \cos \varphi, \quad (1)$$

здесь  $\varphi$  — угол между осями коллиматоров РИ и щелевым коллиматором ИИ.

Для устранения пропуска мертвых зон в направлении, перпендикулярном направлению сканирования, проводят дополнительное сканирование (сканирования) со сдвигом в перпендикулярном направлении.

## 1.2. Базовые закономерности формирования цифровых радиографических изображений в комптоновской цифровой радиографии

Математические модели формирования цифровых радиографических изображений в системах послылой цифровой комптоновской радиографии базируются на закономерностях ослабления, рассеяния и регистрации фотонного излучения.

Для удобства свяжем ось  $z$  декартовой системы координат  $OXYZ$  с центром излучающей поверхности ИИ (см. рис. 1). Плоскость  $\delta$  ограничивает часть пространства, «просматриваемого» коллиматорами ИИ и РИ. Координата  $z$  изменяется в диапазоне от 0 до  $z_{\max}$ . Для геометрии сканирования, приведенной на рис. 1, слой центральной плоскости объекта контроля  $z = z_0$  соотносится со своей группой детекторов.

Расстояние  $z_{\max}$  от ИИ до плоскости  $z = z_{\max}$  не изменяется в процессе сканирования.

Для четкого понимания процессов формирования и обработки информации в послылой цифровой комптоновской радиографии выберем в качестве излучателя фотонов моноэнергетический источник гамма-излучения с энергией  $E_0$ .

При сканировании ОК узким (щелевым) пучком гамма-излучения линейкой детекторов, ассоциированных с плоскостью  $z = z_0$ , формируется цифровое комптоновское радиографическое изображение слоя:

$$\mathbf{N}^{z_0} = \{N_s^{z_0}(x, y) | -A \leq x \leq A, -B \leq y \leq B\}. \quad (2)$$

*Замечание 1.* Цифровое изображение  $\mathbf{N}^{z_0}$  сопоставляется со слоем  $z_0$ , но в этом изображении содержится информация о слоях, лежащих выше.

В формуле (2) точка с координатами  $(x, y)$  для слоя  $z_0$  совпадает с центром соответствующего рассеивающего объема  $V^{z_0}(x, y)$ .

Рассмотрим счетный режим регистрации гамма-излучения. Пусть источник гамма-излучения с энергией  $E$  является точечным. Источник излучает  $N_0$  частиц в единицу времени на единицу площади на заданном расстоянии, например, 1 м. В качестве радиационных преобразователей (РП) регистраторов излучения могут быть использованы сцинтилляционные материалы (собственно сцинтилляторы и сцинтилляционная керамика) или полупроводники. Радиационные преобразователи характеризуются плотностью  $\rho_d$ , эффективным атомным материалом  $Z_d$  и толщиной  $h_d$ . Количество фотонов, рассеянных в объеме  $V^{z_0}(x, y)$  в направлении соответствующего РП и зарегистрированных в нем за время  $t$ , оценивается с помощью следующей формулы:

$$N_s^{z_0}(x, y) \approx \text{int} \left( N_0 t \Omega^{z_0} V^{z_0}(x, y) \frac{d\sigma_{\text{KNT}}(E, \theta)}{d\Omega} \rho_e \Omega_s \exp(-P_n^{z_0}(x, y) - P_s^{z_0}(x, y)) \epsilon(E_s, h_d) \right), \quad (3)$$

где  $\text{int}(\arg)$  — целая часть аргумента  $\arg$ ;  $\Omega^z_0$  — телесный угол, определяемый объемом  $V^z_0(x, y)$ ;  $\Omega^z_s$  — телесный угол, вырезаемой детектором;  $E_s$  — энергия фотонов, рассеянных на угол  $\theta = \pi - \varphi$ ;  $\frac{d\sigma_{\text{KNT}}(E, \theta)}{d\Omega}$  — распределение фотонов по углу рассеяния (формула Клейна-Нишины-Тамма);  $\rho_e$  — плотность электронов;  $P^z_n(x, y)$  — толщина ОК в д.с.п. для первичных фотонов по лучу, соединяющему центр излучающей поверхности ИИ с рассеивающим объемом;  $P^z_s(x, y)$  — толщина ОК в д.с.п. для рассеянных фотонов по лучу, соединяющему центр рассеивающего объема  $V^z_0(x, y)$  с центром соответствующего детектора РИ;  $\varepsilon(E_s, h_d)$  — эффективность регистрации. Плотность электронов  $\rho_e$  определяется плотностью  $\rho$ , атомным номером  $Z$ , молярной массой  $M_Z$  и числом Авогадро  $N_A$  [18]:

$$\rho_e = \frac{\rho N_A Z}{M_Z}. \quad (4)$$

Выражение (3) объединяет несколько закономерностей взаимодействия гамма-излучения с веществом: ослабление нерассеянного и рассеянного излучения; вероятность рассеяния фотона под заданным углом; геометрическое ослабление для источников первичных и вторичных фотонов.

### 1.3. Формирование полутонных послонных изображений в комптоновской цифровой радиографии

Продемонстрируем, как в рассматриваемом варианте комптоновской цифровой радиографии формируется полутонное изображение  $\mathbf{G}^z_0$  для слоя  $z = z_0$ . Формула, описывающая связь изображений  $\mathbf{G}^z_0$  и  $\mathbf{N}^z_0$ , имеет вид:

$$\mathbf{G}^z_0 = \left\{ G^z_s(x, y) = P_{\min} + (P_{\max} - P_{\min}) \frac{N^z_s(x, y) - C^z_{\min}}{C^z_{\max} - C^z_{\min}} \mid -A \leq x \leq A, -B \leq y \leq B \right\}, \quad (5)$$

здесь  $P_{\min}$ ,  $P_{\max}$  — минимальный и максимальный уровни серого тона, удобные для визуального восприятия;  $C^z_{\min}$ ,  $C^z_{\max}$  — минимальные и максимальные значения яркости либо по изображению  $\mathbf{N}^z_0$  (первый вариант), либо по всей совокупности изображений в целом (второй вариант). В первом варианте все изображения в случае наличия рассеивающих и нерассеивающих объемов контрастны. Второй же вариант позволяет проиллюстрировать степень увеличения ослабления первичного и рассеянного излучений по глубине ОК.

## 2. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПОСЛОЙНОЙ КОМПТОНОВСКОЙ РАДИОГРАФИИ

Имитационная модель послонной комптоновской радиографии состоит из нескольких основных блоков: исходные данные модели; моделирование внутренней структуры ОК; формирование цифровых послонных радиографических изображений; визуализация послонных изображений комптоновской радиографии. Остановимся подробнее на вышеотмеченных блоках.

### 2.1. Исходные данные

Объем информации в блоке исходных данных определяется структурой исследуемого комплекса комптоновской радиографии, которая состоит из источника излучения с коллиматором, многоканального детектора с соответствующим коллиматором, устройства сканирования. В силу жесткости коллимации первичного и вторичного пучков излучения можно принять модель однократного рассеяния излучения.

### 2.1.1. Источник излучения с коллиматором

Для обеспечения высокой скорости моделирования рассмотрим источник моноэнергетического гамма-излучения.

Источник излучения применительно к рассматриваемому случаю можно характеризовать двумя параметрами: энергией излучения  $E_0$ ; количеством фотонов  $n_0$ , излучаемых за время  $t$  в телесном угле, соответствующем источнику вторичного излучения для конкретного канала детектора; углом  $\varphi_0$  между осью пучка излучения и нормалью к плоскости  $\gamma$  (см. рис. 1), например,  $\varphi_0 = 0^\circ$ .

### 2.1.2. Детектор излучения с системой коллиматоров

Для обеспечения высокой производительности моделирования выберем счетный режим регистрации рассеянных фотонов. Будем считать каналы детектора идентичными.

Основными параметрами канала детектирования являются: материал радиационного преобразователя (плотность  $\rho$  и химическая формула); толщина РП; поперечные размеры РП  $a \times b$ ; угол  $\theta$  между нормалью к плоскости  $\gamma$  и осями коллиматоров каналов; время измерения  $t$ . Нормаль направлена в сторону, противоположную источнику излучения. Образец одной из таких систем коллиматоров приведен в работе [9].

### 2.1.3. Устройство сканирования

Формирование послойных изображений в комптоновской радиографии может быть реализовано с помощью дискретного или непрерывного сканирования. В первом случае устройство сканирования характеризуется шагом по оси  $x$  —  $h_x$ , а во втором случае — скоростью сканирования  $V_x$ . Следует отметить очевидную связь параметров для отмеченных вариантов:

$$h_x = V_x t. \quad (6)$$

Из (6) вытекает, что параметр  $h_x$  характеризует устройство сканирования.

## 2.2. Моделирование внутренней структуры объекта контроля

Независимо от конкретного способа радиационного исследования внутренней структуры объект контроля считается полностью определенным, если известны распределения плотности  $\rho$  и эффективного атомного номера  $Z$  материала по объему ОК  $V$ ,  $V \subset \mathbb{R}^3$ . Указанное условие описывается следующим выражением:

$$(\forall (x, y, z) \in V, \exists \rho(x, y, z) \wedge \exists Z(x, y, z)) \wedge (\forall (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \setminus V, \rho(x, y, z) = 0, Z(x, y, z) = 0). \quad (7)$$

В цифровой радиографии и рентгеновской компьютерной томографии как на стадии проектирования, так и на этапе оценки параметров систем широко используются фантомы правильной формы с локальными включениями в виде шаров и кубов, лучевые толщины которых могут быть оценены аналитически [19].

## 2.3. Формирование послойных цифровых комптоновских радиографических изображений

Алгоритм формирования цифровых послойных радиографических изображений основывается на обобщающем выражении (3). Это выражение нуждается в пояснениях и уточнениях, способствующих лучшему пониманию функционирования алгоритма и повышению его производительности.

Пусть толщина зоны интереса равна  $H$ , здесь указанная зона располагается между плоскостями  $\gamma$  и  $\delta$ , см. рис. 1. Рассмотрим особенности построения цифровых комптоновских изображений для  $k$ -го слоя,  $k = 1..N_z$ . Слой с номером  $k$  ассоциируется с центром слоя  $z_k$ :

$$z_k = \frac{h_z}{2} + (k-1)h_z, k = 1..K, h_z = \frac{H}{K}. \quad (8)$$

Искомое цифровое изображение слоя  $N^i$  представляет собой распределение числа рассеянных фотонов по сетке:

$$(x_i, y_j), x_i = (i-1)h_x, y_j = (j-1)h_y, i = 1..I, j = 1..J, \quad (9)$$

здесь  $h_x, h_y$  — шаги по осям  $x$  и  $y$ ,  $h_x < a$ ,  $h_y = b$ .

### 2.3.1. Ослабление первичного потока фотонов до $i$ -го слоя

С учетом параметра  $n_0$ , введенного выше, количество фотонов  $N_{ij}^k$ , дошедших до рассеивающего объема, находится с помощью выражения:

$$N_{ij}^k \approx n_0 e^{-P_i(i,j,k)}, \quad (10)$$

здесь  $P_i(i, j, k)$  — толщина ОК в д.с.п. по лучу, соединяющему излучающую точку и центр источника вторичного фотонного излучения  $(x_i, y_j, z_k)$ .

Формула для оценки величины  $P_i(i, j, k)$  для  $\varphi = 0$  имеет вид:

$$P_i(i, j, k) = \int_0^{z_k - R} \rho(x_i, y_j, L + R) m(E_0, Z(x_i, y_j, L + R)) dL, \quad (11)$$

здесь  $R$  — расстояние от источника излучения до плоскости  $\gamma$  (см. рис. 1);  $m(E_0, Z(x_i, y_j, L))$  — массовый коэффициент ослабления гамма-излучения с энергией  $E_0$ ;  $Z(x_i, y_j, L)$  — эффективный атомный номер в точке с координатами  $(x_i, y_j, L)$ .

### 2.3.2. Доля фотонов, рассеянных в направлении детектора

Часть фотонов  $w_s$ , испытавших взаимодействие с веществом в объеме  $V(x_i, y_j, z_k)$ , рассеивается в направлении соответствующего детектора:

$$w_s \approx \frac{f_{\text{KNT}}(E_0, \theta) \rho(x_i, y_j, z_k) N_A Z(x_i, y_j, z_k)}{M(Z(x_i, y_j, z_k))} d\Omega_k, \quad (12)$$

здесь  $f_{\text{KNT}}(E_0, \theta)$  — формула Клейна—Нишины—Тамма;  $M$  — молярная масса;  $N_A$  — число Авогадро;  $d\Omega_k$  — телесный угол соответствующего детектора.

Следует отметить, что в случае выполнения равенства плотности нулю, то есть  $\rho(x_i, y_j, z_k) = 0$ , величина  $w_{su} = 0$ .

Формула для вычисления телесного угла  $d\Omega_i$  имеет вид:

$$d\Omega_i = \frac{ab}{4\pi(z_i \cos(\varphi))^2}. \quad (13)$$

### 2.3.3. Ослабление и регистрация рассеянного излучения

Угол рассеяния  $\theta$  для всех слоев один и тот же, поэтому и энергия рассеянных фотонов  $E_s(E_0, \theta)$  одна и та же:

$$E_s(E_0, \theta) = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{511} \cdot (1 - \cos \theta)}. \quad (14)$$

Выражение для оценки количества рассеянных фотонов  $Ns_{ij}^k$ , зарегистрированных детектором, выглядит следующим образом:

$$Ns_{ij}^k \approx N_{ij}^k w_i e^{-P_s(i,j,k)}, \quad (15)$$

где  $P_s(i, j, k)$  — толщина части ОК в д.с.п. по лучу, соединяющему центр источника вторичного фотонного излучения  $(x_i, y_j, z_k)$  и центр соответствующего детектора.

Величина  $P_s(i, j, k)$  вычисляется по формуле:

$$P_s(i, j, k) = \int_0^{\frac{z_k - R}{\cos \varphi}} \rho(x_i + L \sin \varphi, y_j, z_k - L \cos \varphi) m(E_s, Z(x_i + L \sin \varphi, y_j, z_k - L \cos \varphi)) dL. \quad (16)$$

Совокупность формул (6)—(16) представляет собой имитационную модель формирования послойных цифровых комптоновских радиографических изображений. При наличии формульного описания ОК эта имитационная модель легко трансформируется в программу на MathCad. Выбор в пользу системы для математических вычислений MathCad обусловлен близостью ее языка и языка математики, что существенно упрощает понимание соответствующих программ и возможность их использования в учебном процессе.

### 3. ПРИМЕР ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Объектом для имитационного моделирования был выбран однородный барьер из алюминия толщиной  $H = 25$  мм, а в качестве источника гамма-излучения — радиоизотоп Cs-137 с энергией  $E_0 = 661$  кэВ. Расстояние от источника до фронтальной поверхности барьера  $R = 50$  мм. Угол  $\varphi = 45^\circ$ ,  $a = b = 0,2$  мм,  $h_x = h_y = h_z = 0,15$  мм,  $n_0 = 10^{14}$ . В качестве радиационных преобразователей использованы сцинтилляторы CsI толщиной 1 мм.

Для иллюстрации рассмотрим объект с четырьмя сферическими включениями радиусом  $r_{s1} = r_{s2} = r_{s3} = r_{s4} = 2$  мм, плотностью материала сфер  $\rho_{s1} = \rho_{s2} = \rho_{s3} = \rho_{s4} = 1$  г/см<sup>3</sup>, координатами центров сфер

$$\begin{pmatrix} x_{s1} & x_{s2} & x_{s3} & x_{s4} \\ y_{s1} & y_{s2} & y_{s3} & y_{s4} \\ z_{s1} & z_{s2} & z_{s3} & z_{s4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 30 \text{ мм} & 35 \text{ мм} & 40 \text{ мм} & 45 \text{ мм} \\ 6 \text{ мм} & 11 \text{ мм} & 16 \text{ мм} & 21 \text{ мм} \\ 55 \text{ мм} & 60 \text{ мм} & 65 \text{ мм} & 70 \text{ мм} \end{pmatrix}.$$

Эффективный атомный номер материала сфер близок к 13.

#### 3.1. Результаты имитационного моделирования

На рис. 2 приведены цифровые комптоновские изображения слоев на глубине от 3 мм до 24 мм. При визуализации полутоновых изображений, сформированных с помощью (5), использовался смешанный вариант  $N_{\min} = \min_{i,j,k} (Ns_{ij}^k)$ ,  $C_{\max k} = \max(Ns^k)$ . Этот вариант позволяет осуществить визуальное сравнение изображений. На приведенных изображениях более светлым тонам соответствуют большие количества зарегистрированных фотонов, а более темным — меньшие.

Из анализа приведенных данных можно сделать вывод о применимости разработанной имитационной модели для решения задачи проектирования систем ПЦКР для контроля объектов с односто-

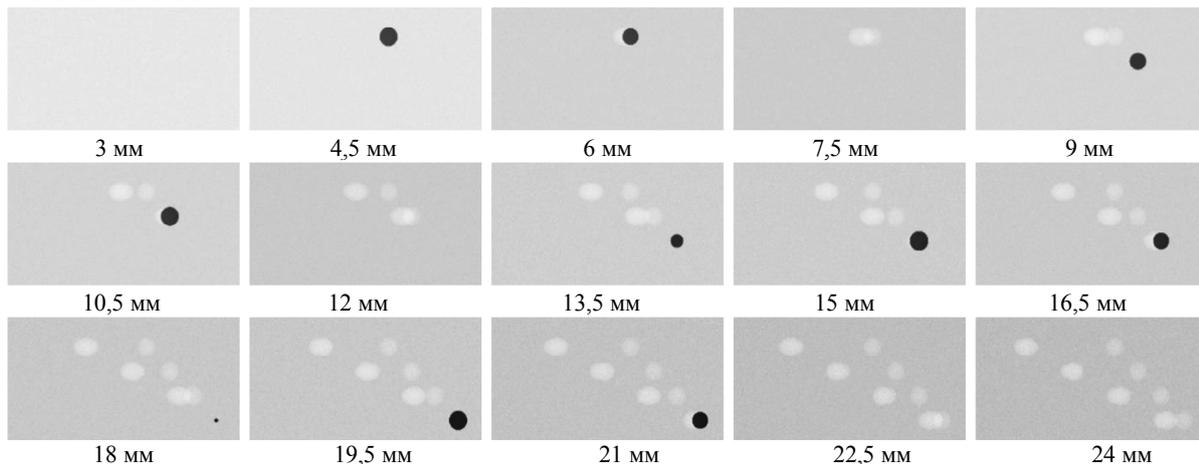


Рис. 2. Визуальные комптоновские изображения ОК из алюминия со сферическими включениями по слоям.

ронним доступом. Несмотря на корректировку яркости слоев при визуализации, фон изображений слоев темнеет с увеличением глубины слоев. Следует также отметить, что тени локальных включений наблюдаются на изображениях слоев, удаленных от источника вторичных фотонов. Результаты моделирования подтверждают основные выводы из статьи [12] относительно теней локальных включений. Наличие отмеченных теней локальных включений на изображениях нижних слоев является мешающим фактором. Впрочем, существуют алгоритмы, снижающие вклад отмеченных теней в итоговые изображения [12] и превращающие описанный выше метод в полноценный способ исследования пространственной структуры объекта контроля. Ниже приведем один из них.

### 3.2. Трансформация исходных изображений в распределения оценок плотности по слоям тестового объекта

Для иллюстрации приведем упрощенную версию алгоритма, близкую к подходу из [12]. Из формул (10), (12), (15) следует, что

$$Ns_{ij}^k \approx \frac{\rho(x_i, y_j, z_k) Z(x_i, y_j, z_k)}{M(Z(x_i, y_j, z_k))} \approx \frac{\rho(x_i, y_j, z_k)}{2}. \quad (17)$$

Вспользуемся тем, что индустриальные объекты имеют четкое описание внутренней структуры. Алгоритм основан на сравнении  $Ns_{ij}^k$  с калибровочными данными  $\overline{Ns}_{ij}^k$ , полученными по эталонному образцу, для которого  $\rho(x_i, y_j, z_k) = \rho_0$ . Для рассматриваемого случая эталонный объект представляет собой однородную алюминиевую пластину толщины  $H$ . Из (17) следует, что

$$\rho(x_i, y_j, z_k) \approx \rho_0 \frac{Ns_{ij}^k}{\overline{Ns}_{ij}^k}. \quad (18)$$

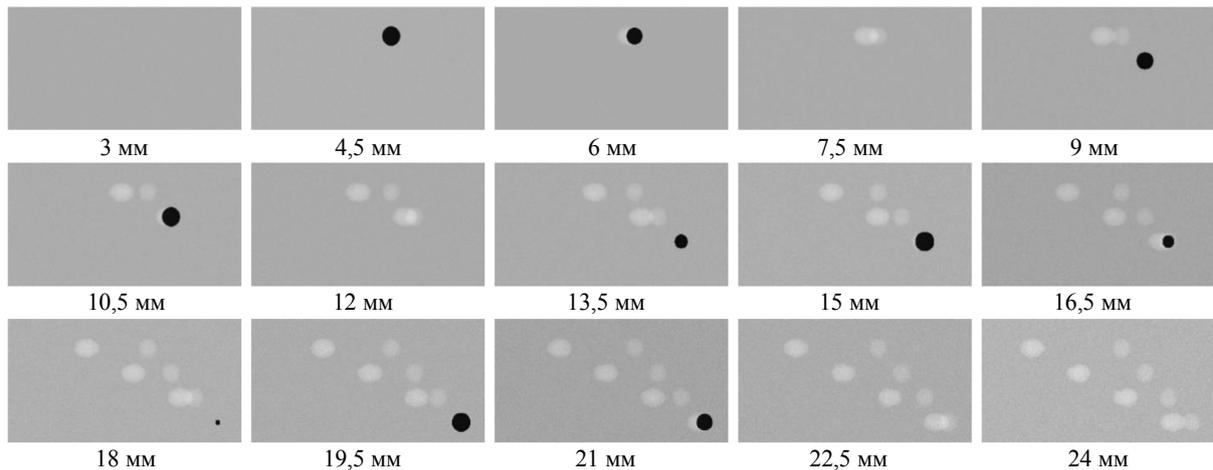


Рис. 3. Визуализация распределений оценок плотности по слоям тестового объекта.

Преобразование (18) позволяет сделать оценку распределения плотности по объему  $W$ , но с сохранением теней локальных включений в нижерасположенных слоях. Достоинством преобразования (18) является то, что фоновые фрагменты соответствующих послыльных изображений близки по тону. Иллюстрация этого вывода приведена на рис. 3. На рисунке меньшей плотности материала объекта контроля соответствуют более темные тона. Это сделано с целью более яркого визуального подчеркивания теней на изображениях нижерасположенных слоев.

### 3.3. Компенсация теней локальных включений

#### 3.3.1. Классификация теней локальных включений

Алгоритм компенсации теней локальных включений базируется на жесткой определенности геометрии схемы контроля. В [12] приведена схема формирования теней в послыльной комптоновской радиографии. Эти тени можно разделить на два вида.

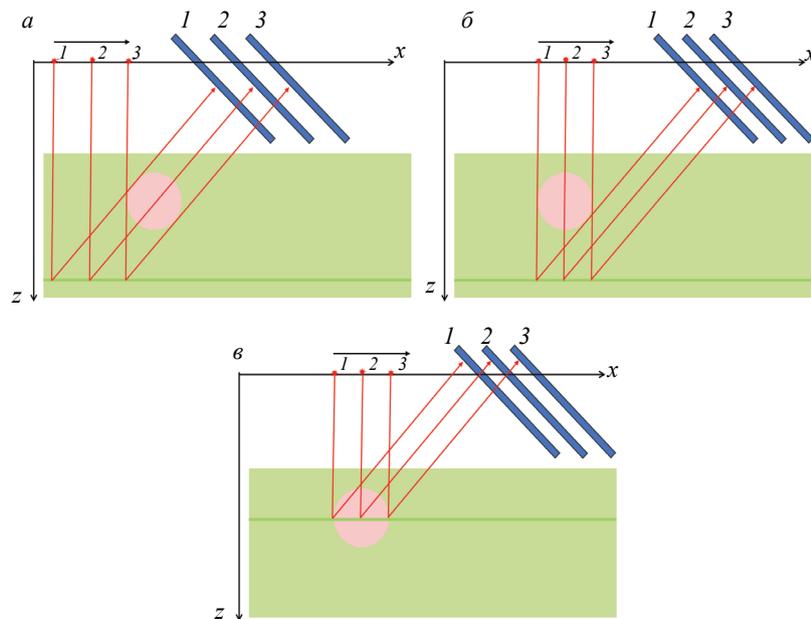


Рис. 4. Формирование изображений в послойной комптоновской цифровой радиографии:  
 а — тени первого типа; б — тени второго типа; в — тени центрального слоя локального включения.

Иллюстрации схем формирования изображений теней и центрального слоя локального включения приведены на рис. 4. На рисунке стрелкой отмечено направление перемещения источника и детектора излучения. Напомним, что расстояние ИИ и ДИ является неизменным. Слой, формирующий изображение, выделен светло-зеленым цветом. Цифрами 1, 2, 3 на рисунке обозначены характерные согласованные положения системы источник-детектор. Из анализа схемы следует, что тени первого вида связаны в основном с трансформацией потока вторичного (рассеянного) излучения локальным включением, а тени второго вида — преимущественно с трансформацией локальным включением потока первичного излучения.

Особенностью теней первого вида является их расположение на изображениях нижних слоев непосредственно под изображением локального включения при первом его появлении на изображениях слоев. Напомним, что просмотр формируемых изображений осуществляется в направлении сверху вниз. Тени же второго рода с увеличением глубины слоя отдаляются от тени первого рода. Это подтверждается изображениями слоев на рис. 3. Очевидно, что размеры теней первого вида совпадают с размерами проекций локальных включений на исследуемый слой. Размеры же теней второго вида в направлении  $x$  существенно больше, чем размеры теней первого вида. Нумерация теней связана с последовательностью появления изображений теней локальных включений. Отсчет для каждого слоя ведется слева направо.

### 3.3.2. Алгоритм компенсации теней локальных включений

В [12] предложен один из наиболее эффективных алгоритмов компенсации теней локальных включений в анализируемой реализации комптоновской радиографии (томографии). Этот алгоритм базируется на связи положения локального включения, определяемого по трансформированным послойным комптоновским изображениям, и теней первого и второго вида. Используя общую идею алгоритма, модифицируем его с целью обеспечения высокой производительности вычислений. Приведем кратко основные этапы модифицированного алгоритма. Для более ясного понимания рассматриваются сферические включения.

*Этап 1.* Определение параметров локального включения.

Пусть в результате совместной обработки послойных изображений обнаружены все локальные сферические включения и найдены векторы оценок координат центров  $\mathbf{x}_s^*$ ,  $\mathbf{y}_s^*$ ,  $\mathbf{z}_s^*$  и радиусов  $\mathbf{r}_s^*$ .

Этапы с первого по четвертый выполняются для всех локальных включений.

*Этап 2.* Определение глубины слоя, с которого начинается формирование тени.

Пусть имеется обнаруженное включение с параметрами  $x_s^*$ ,  $y_s^*$ ,  $z_s^*$  и  $r_s^*$ .

Вычисляется глубина слоя  $z_{\text{lim } 1}$ , начиная с которой наблюдается тень первого вида от локального включения. Изображение слоя  $z = z_L$  включает в себя тень локального включения первого вида, если выполняется условие:

$$z_L \geq z_{\text{lim } 1} = z_s^* - r_s^* \sin \varphi. \quad (19)$$

Тень второго вида начинает наблюдаться со слоя, расположенного ниже плоскости  $z = z_s^*$ . Отсюда следует, что формула для вычисления глубины соответствующего слоя  $z_{\text{lim } 2}$  имеет вид:

$$z_{\text{lim } 2} = z_s^*. \quad (20)$$

*Этап 3.* Условия отнесения точки с координатами  $(x, y, z_L)$  к теням первого или второго вида.

Точка с координатами  $(x, y, z_L)$  относится к тени первого вида, если луч рассеянного излучения, исходящий из этой точки, пересекает локальное включение. Точка относится к тени второго вида, если луч первичного излучения, проходящий через отмеченную точку, пересекает локальное включение. Очевидно, что и в первом, и во втором случае отнесение точки к тени первого или второго вида определяется расстояниями  $d_1$  и  $d_2$  от центра сечения по  $y$  сферического локального включения до соответствующих лучей (прямых).

Выражения для вычисления  $d_1$  и  $d_2$  выглядят следующим образом:

$$d_{1,2} = \frac{|A_{1,2}x_s + B_{1,2}z_s + C_{1,2}|}{\sqrt{A_{1,2}^2 + B_{1,2}^2}}, \quad (21)$$

где  $A_{1,2}$ ,  $B_{1,2}$ ,  $C_{1,2}$  — параметры уравнений прямых, записанных в каноническом виде

$$AX + BZ + C = 0.$$

Связь параметров  $A_{1,2}$ ,  $B_{1,2}$ ,  $C_{1,2}$  и параметров схемы контроля задается уравнением:

$$\begin{pmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \tan \varphi & -x - z_L \tan \varphi \\ 1 & 0 & -x \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Точка с координатами  $(x, y, z_L)$  относится к теням первого или второго вида, если

$$d_{1,2}^2 < r_s^{*2} - (y - y_s^*)^2. \quad (23)$$

*Этап 4.* Вычисление толщин локального включения по лучам.

В случае выполнения одного или двух условий (23) толщина (толщины) локального включения по лучу (лучам)  $h$  находится по формуле:

$$h = 2\sqrt{r_s^{*2} - (y - y_s^*)^2} d^2. \quad (24)$$

*Этап 5.* Вычисление корректирующих множителей.

Массовые коэффициенты ослабления гамма-излучения  $m_0$  и  $m_s$  материалом ОК для энергий  $E_0$  и  $E_s$  определяются по таблицам ослабления гамма-излучения [20] либо оцениваются экспериментально.

Формула для оценки корректирующего множителя  $k_1(x, y, z)$  применительно к рассматриваемому примеру и первому виду теней имеют вид:

$$k_1(x, y, z) = \exp(m_s(\rho - \rho_0) h_1(x, y, z)). \quad (25)$$

Выражение для вычисления корректирующего множителя  $k_2(x, y, z)$  для второго вида теней выглядит аналогично:

$$k_2(x, y, z) = \exp(m_0(\rho - \rho_0) h_2(x, y, z)). \quad (26)$$

Формула для определения соответствующего коэффициента  $k_3(x, y, z)$  для случая наложения теней первого и второго вида выглядит следующим образом:

$$k_3(x, y, z) = \exp\left(m_s(\rho^* - \rho_0^*)h_1(x, y, z) + m_0(\rho^* - \rho_0^*)h_2(x, y, z)\right). \quad (27)$$

Отметим, что значения коэффициентов  $k_1, k_2, k_3$  вне соответствующих теней равны 1.

*Этап 6.* Коррекция исходных изображений.

Коррекция исходных изображений осуществляется по формуле:

$$Ns_{ij}^{*k} = Ns_{ij}^k \times k(x_i, y_j, z_k). \quad (26)$$

*Этап 7.* Определение пространственного распределения плотности.

Оценка скорректированного пространственного распределения плотности  $\rho^*(x_i, y_j, z_k)$  вычисляется как

$$\rho^*(x_i, y_j, z_k) = \rho_0 \frac{Ns_{ij}^{*k}}{Ns_{ij}^k}. \quad (27)$$

На рис. 5 приведена совокупность изображений слоев тестового объекта после компенсации теней локальных включений.

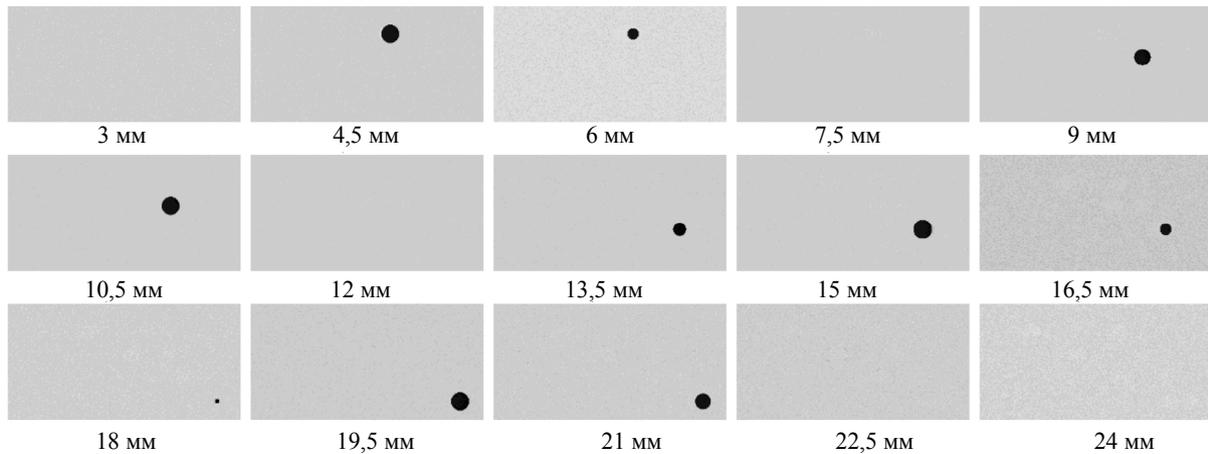


Рис. 5. Итоговые распределения оценок плотности по слоям тестового объекта.

Сравнение изображений, приведенных на рис. 3 и 5, позволяет судить о высокой эффективности алгоритма компенсации теней локальных включений в частности и имитационной модели послылой комptonовской радиографии в целом. Ореолы остаточных теней практически не наблюдаются. Для рассматриваемого алгоритма имитационного моделирования погрешность оценки плотности материала локального включения не превосходит  $0,1 \text{ г/см}^3$ .

Анализируемый способ позволяет оценить распределение плотности по объему объекта испытаний, поэтому можно считать рассмотренную реализацию послылой цифровой комptonовской радиографии разновидностью цифровой комptonовской томографии.

*Замечание 2.* Для ускорения процесса вычислений при моделировании предлагаемый алгоритм может быть дополнен блоком масштабирования [21], позволяющим заменить интегралы в (11), (16) суммами по учащенной сетке  $(x_i, y_j, z_k)$ .

Визуальное сопоставление результатов симуляции и результатов экспериментов [12] подтверждают эффективность предложенного алгоритма имитационного моделирования послылой цифровой комptonовской радиографии (томографии) на всех этапах формирования и трансформации изображений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана имитационная модель послойной цифровой комптоновской радиографии (томографии), предназначенная для исследования структуры объекта. Предложенная модель учитывает геометрическую схему контроля, параметры источника и блока регистрации гамма-излучения, оснащенного специальной системой коллиматоров. Возможность применения имитационной модели продемонстрирована для алюминиевого барьера со сферическими локальными включениями. Имитационная модель послойной цифровой комптоновской радиографии (томографии) и реализующая ее программа на MathCad могут быть использованы на стадии проектирования соответствующих систем, а также в учебном процессе в качестве виртуального комплекса послойной комптоновской радиографии (томографии). Разработанная имитационная модель легко адаптируется для источников рентгеновского и тормозного излучения и допускает учет когерентного рассеяния.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chotas H.G., Dobbins III J.T., Ravin C.E.* Principles of digital radiography with large-area, electronically readable detectors: a review of the basics // *Radiology*. 1999. V. 210. No. 3. P. 595—599. <https://doi.org/10.1148/radiology.210.3.r99mr15595>
2. *Korner M., Weber C.H., Wirth S., Pfeifer K.J., Reiser M.F., Treitl M.* Advances in digital radiography: physical principles and system overview // *Radiographics*. 2007. V. 27. No. 3. P. 675—686. <https://doi.org/10.1148/rg.273065075>
3. *Logan C.M., Schneberk D.J., Shull P.J., Martz H.E.* X-ray Imaging: fundamentals, industrial techniques and applications. CRC Press, 2016.
4. *Kalender W.A.* X-ray computed tomography // *Physics in Medicine & Biology*. 2006. V. 51. No. 13. P. R29—R43. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/51/13/r03>
5. *Hsieh J.* Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances. Bellingham, WA : SPIE, 2009.
6. *Thompson A., Maskery I., Leach R.K.* X-ray computed tomography for additive manufacturing: a review // *Measurement Science and Technology*. 2016. V. 27. No. 7. No. article 072001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/27/7/072001>
7. *Kolkoori S., Wrobel N., Zscherpel U., Ewert U.* A new X-ray backscatter imaging technique for non-destructive testing of aerospace materials // *NDT & E International*. 2015. V. 70. P. 41—52. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2014.09.008>
8. *Kelley J., Cui S., Baciak J.* Measurement of the modulation transfer function for a backscatter radiography system used in nondestructive examination // *Radiation Physics and Chemistry*. 2019. V. 155. P. 202—208. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.10.004>
9. *Balamesh A., Salloum M., Abdul-Majid S.* Feasibility of a new moving collimator for industrial backscatter imaging // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2018. V. 29. No. 3. P. 143—155. <https://doi.org/10.1080/09349847.2017.1281465>
10. *Yumashev V.M., Samosadnyi V.T., Kadilin V.V., Mishchenko A.Y.* Possibilities of transmission radiation tomography and tomography based on backscattered radiation // *Atomic Energy*. 2015. V. 119. No. 1. P. 64—67. <https://doi.org/10.1007/s10512-015-0030-6> [*Юмашев В.М., Самосадный В.Т., Кадилин В.В., Мищенко А.Ю.* Возможности трансмиссионной радиационной томографии и томографии на обратно-рассеянном излучении // *Атомная энергия*. 2015. Т. 119. № 1. С. 56—57.]
11. *Strecker H.* Scatter imaging of aluminium castings using an X-ray fan beam and a pinhole camera // *Materials Evaluation*. 1982. V. 40. No. 10. P. 1050—1056.
12. *Ham Y.S., Poranski C.F., Greenawald E.C.* A practical algorithm for reconstruction from X-ray backscatter data // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. Springer, Boston, MA, 1996. P. 449-455. [https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0383-1\\_57](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0383-1_57)
13. *Osipov S.P., Chakhlov S.V., Kairalapov D.U., Sirot'yan E.V.* Numerical modeling of radiographic images as the basis for correctly designing digital radiography systems of large-sized objects // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019. V. 55. No. 2. P. 136—149. <https://doi.org/10.1134/S1061830919020050> [*Осипов С.П., Чахлов С.В., Кайролапов Д.У., Сиrot'ян Е.В.* Численное моделирование радиографических изображений — основа корректного проектирования систем цифровой радиографии крупногабаритных объектов // *Дефектоскопия*. 2019. No. 2. С. 43—55.]
14. *Darvish-Molla S., Spurway A., Sattarivand M.* Comprehensive characterization of ExacTrac stereoscopic image guidance system using Monte Carlo and Spektr simulations // *Physics in Medicine & Biology*. 2020. V. 65. No. 24. No. article 245029. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ab91d8>
15. *Jamshidi V., Davarnejad R.* Simulation of corrosion detection inside wellbore by X-ray backscatter radiography // *Applied Radiation and Isotopes*. 2019. V. 145. P. 116—119. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.12.026>

16. *Abdul-Majid S., Balamesh A.* Single side imaging of corrosion under insulation using single photon gamma backscattering // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2014. V. 25. No. 3. P. 172—185. <https://doi.org/10.1080/09349847.2013.869376>
  17. *Yaffe M.J., Rowlands J.A.* X-ray detectors for digital radiography // *Physics in Medicine & Biology*. 1997. V. 42. No. 1. P. 1—39. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/42/1/001>
  18. *Yun S., Kim S.H., Kim D.W., Kim H.K.* Detective quantum efficiency of a phosphor-coupled photodiode array detector for use in digital X-ray tomosynthesis systems // *NDT & E International*. 2017. V. 92. P. 130—135. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.08.003>
  19. *Osipov S.P., Yadrenkin I.G., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Usachev E.Yu.* Simulation modelling in digital radiography with allowance for spatial outlines of test objects // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56 No. 8. P. 647—660. <https://doi.org/10.1134/S1061830920080082> [*Осипов С.П., Ядренкин И.Г., Чахлов С.В., Осипов О.С., Усачев Е.Ю.* Имитационное моделирование в цифровой радиографии с учетом пространственных форм объектов контроля // *Дефектоскопия*. 2020. No. 8. С. 35—48.]
  20. *Berger M.J., Hubbell J.H., Seltzer S.M., Chang J., Coursey J.S., Sukumar R., Zucker D.S., Olsen K.* XCOM: Photon cross sections database, NIST standard reference database 8 (XGAM). <https://dx.doi.org/10.18434/T48G6X>
  21. *Osipov S.P., Prischepa I.A., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Usachev E.Yu.* Algorithms for modeling the formation and processing of information in X-ray tomography of foam materials // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. V. 57. No. 3. P. 238—250. <https://doi.org/10.1134/S1061830921030050> [*Осипов С.П., Прищепина И.А., Чахлов С.В., Осипов О.С., Усачев Е.Ю.* Алгоритмы моделирования и обработки информации в рентгеновской томографии пеноматериалов // *Дефектоскопия*. 2021. № 3. С. 53—65.]
-

## ПАМЯТИ ТОВАРИЩА

27 мая 2021 года на 81-м году жизни после продолжительной болезни скончался известный ученый, член редакционного совета журнала «Дефектоскопия», профессор, доктор технических наук, председатель Болгарского общества НК **Митко Минков Миховски**. Митко Миховски родился 5 декабря 1940 г. в Софии. Отслужив армию, он в 1960 г. поступает в ВМЭИ им. В.И. Ленина в Софии, откуда после двух лет учебы был направлен в Ленинград для продолжения образования в ЛЭТИ им. В.И. Ульянова-Ленина. В 1966 г. Митко Миховски закончил ЛЭТИ по специальности «Электроакустика и ультразвуковая техника».

В 1973 г. он защищает кандидатскую диссертацию (руководитель: профессор, доктор физико-математических наук Л.Г. Меркулов) в Таганрогском радиотехническом институте (г. Таганрог Ростовской области). С 1967 г. и до самой своей кончины Митко Миховски работал в Болгарской академии наук (БАН). В 1991 г. он защищает докторскую диссертацию и в 2001 году получает звание профессора.

С 1970 г. Митко Миховски член Общества неразрушающего контроля Болгарии, а с 2000 г. становится его президентом. За свою плодотворную профессиональную деятельность Миховски был избран академиком Международной академии неразрушающего контроля, почетным членом Израильского общества НК, представителем Болгарии в ICNDT и ERNDT, председателем болгарского общества «Акустика», главным редактором международного журнала «Machines. Technologies. Materials», членом редакционных советов журналов «Дефектоскопия», «Территория NDT» и др.

За 55 лет научной, преподавательской и общественной деятельности он создал свою научную школу по неразрушающему контролю в Институте механики БАН, организовал Школу дефектоскопии при Центре подготовки кадров БАН. Митко Миховски является автором 10 монографий, более 500 публикаций, 20 патентов и авторских свидетельств. Он был организатором ежегодных международных «Дней неразрушающего контроля» в Созополе (Болгария) и начальником Учебного центра по неразрушающему контролю на АЭС «Козлодуй». Награжден орденом «Кирилл и Мефодий», медалью «Климент Охридский», наградами имени Славчо Попова и Асена Златарова и др. наградами.



Участники 1-й Международной школы «Акустическая эмиссия в диагностике предразрушающего состояния и прогнозирования разрушения сварных конструкций» (Варна, Болгария, 1986 г.). Слева направо: Ю.П. Бородин (ЦАГИ), Я. Немец (АН ЧССР), В.И. Иванов (ЦНИИТМАШ), М. Миховски (БАН), В.А. Гуменюк (ЦНИИ им. Крылова), С.И. Буйло (РГУ).

С Митко мы познакомились более 35 лет назад на 1-й Международной школе по акустической эмиссии в болгарском городе Варна, и с тех пор часто пересекались на различных международных научных мероприятиях. Миховски был постоянным участником европейских, всесоюзных и международных конференций. В совершенстве владел как русским, так и английским языками. Однако, если был выбор, все доклады делал на русском.

Митко очень тепло относился к нашей стране, часто бывал в г. Свердловске (ныне Екатеринбург). Многие годы у него были профессиональные и дружеские связи с будущим академиком РАН Эдуардом Степановичем Горкуновым. Вспоминается такой случай. Участвуя в 1990 г. в работе 12-й Всероссийской научно-технической конференции по НК и ТД в г. Свердловске, мне по



Участники 20-й Международной конференции «Современные методы и средства НК и ТД» (Гурзуф, Крым, 2012 г.). Слева направо: Й. Мирчев (БО НК), А.В. Мозговой (вице-президент УО НКТД), В.А. Троицкий (президент УО НКТД), М. Миховски (президент БО НК), С.И. Буйло (ЮФУ), А. Алексиев (БО НК).



С.И. Буйло и М. Миховски в бассейне гостиницы в перерыве между заседаниями.

какому-то вопросу потребовалось зайти в Оргкомитет к Э.С. Горкунову. Был уже поздний вечер, и в Оргкомитете я нашел одного Эдуарда Степановича Горкунова, который за чашкой кофе весьма эмоционально о чем-то спорил с Митко Миховски. Подойдя ближе, я обнаружил, что тема их спора касалась тематики изобразительного искусства и была весьма далека от вопросов дефектоскопии! Тема оказалась настолько интересной, что я тоже присоединился к беседе и через несколько минут уже совершенно позабыл о проблеме, с которой шел в Оргкомитет.

В 2014 году годовая отчетная конференция по европейскому проекту INNOPIRES проводилась на базе Южного федерального университета (ЮФУ) в Ростове-на-Дону. По прилету в Ростов все болгарские участники отправились в гостиницу, только Митко Миховски, не выходя из аэропорта, тут же улетел на два дня в Екатеринбург для встречи с Горкуновым и вернулся в Ростов уже прямо к своему докладу. Покидая Ростов, Митко подарил мне свою выполненную на компьютере абстрактную картину, которая теперь висит у меня над столом. Очень печально, что Митко Миховски ушел из жизни всего через несколько месяцев после безвременной кончины его друга и соратника Э.С. Горкунова. Митко Миховски был высококлассным специалистом, очень приятным в общении, ответственным и отзывчивым человеком. Светлая ему память.

**Буйло Сергей Иванович**  
доктор физико-математических наук  
Южный федеральный университет