

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗОНДИРУЮЩЕГО ИМПУЛЬСА В СЛОИСТОЙ СРЕДЕ МЕТОДОМ ABCD-МАТРИЦ

А.И. Пашкин<sup>1</sup>, В.А. Винников<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com.

**Аннотация:** Проанализированы современные способы моделирования распространения акустических волн в слоистых средах и обоснована необходимость разработки нового, более быстрого метода. Представлен метод моделирования распространения упругих волн на основе преобразования сигнала с использованием ABCD-матриц, для реализации которого разработана компьютерная программа на языке Python. Рассмотрены теоретические основы и математический алгоритм представленного метода, а также приведены расчеты основных физических и математических зависимостей, используемых для реализации метода в программе. Проанализирована корреляция между смоделированным сигналом и сигналом, полученным экспериментально от среды с заранее определенными параметрами. Приведены временные формы и спектры сигнала внутри оптико-акустического преобразователя в двух случаях. В первом случае рассматривается оптико-акустический преобразователь со свободной поверхностью (граница с воздухом), во втором случае рассматривается оптико-акустический преобразователь, прижатый к стальной пластине. На основании полученных данных доказана применимость указанного метода для моделирования распространения акустических сигналов в плоско-слоистой среде. Основным достоинством предложенного метода моделирования является высокая скорость расчета формы и спектра сигнала в любой точке среды в заданный момент времени.

**Ключевые слова:** лазерная оптико-акустика, ультразвуковой контроль, слоистые среды, дефектоскопия, методы моделирования, ABCD-матрицы, структуроскопия, распространение акустического импульса.

**Для цитирования:** Пашкин А.И., Винников В.А. Моделирование распространения лазерно-ультразвукового зондирующего импульса в слоистой среде методом ABCD-матриц // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 6. – С. 140–150. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-140-150.

### Modeling propagation of laser–ultrasonic probing pulse in stratified medium by the method of ABCD matrices

A.I. Pashkin<sup>1</sup>, V.A. Vinnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com.

**Abstract:** The modern methods of modeling acoustic wave travel in stratified media are reviewed, and the necessity of a new and faster technique is justified. The method of modeling elastic wave propagation based on signal conditioning using ABCD matrices and a Python software is described. The theoretical framework and the mathematical algorithm of the presented

method are discussed. The main calculations of the main physical and mathematical relations of the method implementation in the program are given. The model signal is correlated with the test signal obtained from a medium with pre-set parameters. The temporal shapes and spectra of the signal inside an optical-acoustic converter are presented for two cases. In the first case, the optical-acoustic converter has a free surface (boundary with air); in the second case, the optical-acoustic converter is pressed to a steel plate. Based on the obtained data, the applicability of the method to modeling acoustic signal propagation in flat and stratified medium is proved. The critical advantage of the proposed modeling approach is high calculating speed of the signal shape and spectrum at any point of the medium and at any assigned time.

**Key words:** laser optics-acoustics, ultrasonic control, stratified media, defectoscopy, modeling methods, ABCD matrices, structurescopy, acoustic pulse propagation.

**For citation:** Pashkin A. I., Vinnikov V. A. Modeling propagation of laser-ultrasonic probing pulse in stratified medium by the method of ABCD matrices. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(6):140-150. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-140-150.

---

## Введение

Определение форм, размеров и положения дефектов в твердых гетерогенных средах является основной задачей при определении структурной прочности, диагностики качества изделий и мониторинга в горном деле. На сегодняшний день разработано и используется множество различных методов решения данной задачи, в том числе: рентгеновская [1] и электромагнитная [2–3] томография, тепловизионный контроль [4], ультразвуковая структуроскопия и томография [5–8] и др. [9–10]. Но, несмотря на наличие множества методов получения механических свойств исследуемых объектов, большинство этих методов не позволяет полностью восстановить их внутреннюю структуру и расположение дефектов без использования различных типов обратного преобразования при моделировании. Таким образом, учитывая трудоемкость данного моделирования, требуются новые высокопроизводительные программные решения для построения соответствующих моделей [11–15].

Среди методов моделирования самым распространенным является метод конечных элементов (МКЭ), а также его

различные вариации [16–20]. Основным плюсом МКЭ является возможность применять его для моделирования структур любой сложности и с высокой точностью расчета, что приводит к увеличению времени, необходимого на обработку модели. При этом скорость расчета резко уменьшается при незначительном усложнении модели [16–18]. В связи с универсальностью метода многие исследователи занимаются модификациями МКЭ. Например, авторы статьи [19] предложили метод, основывающийся на МКЭ с масштабируемыми границами, ускоряющий расчеты в случае высокочастотных сигналов; а в работе [20] предложено использовать для решения задачи моделирования расширенный МКЭ, называемый также XFEM. Но доработка и изменение МКЭ не может полностью решить проблему скорости расчета. Таким образом, разработка альтернативного, более производительного метода моделирования остается актуальной задачей.

В данной работе представлен полуаналитический метод расчета пространства лазерно-ультразвукового зондирующего импульса с гауссовым поперечным профилем пучка в плоско-

слоистой среде, основанный на методе *ABCD*-матриц [22], применяемом в основном в оптике. Данный подход позволяет идентифицировать отражения и реверберации в плоско-слоистой среде, а также учесть изменение временной формы зондирующего импульса из-за дифракции и затухания.

### Теоретические основы

В лазерно-ультразвуковой (ЛУ) диагностике оптический импульс поглощается в плоскопараллельной пластиковой пластинке — оптоакустическом генераторе (ОАГ) (рис. 1). Один из данных сигналов распространяется в акустически прозрачную призму (рис. 1), совмещенную с широкополосным пьезоприемником и служит опорным сигналом, второй распространяется через генератор (рис. 1) в исследуемую среду. Возникает две границы раздела: генератор — призма и генератор — исследуемая среда. На каждой границе возникают отраженные и прошедшие волны. Следовательно, для корректного описания структурных особенностей образцов горных пород с использованием зондирующих импульсов необходимо знать их спектральные характеристики с учетом всех границ и переотражений.

Для моделирования распространения ЛУ зондирующего импульса разработана программа для ЭВМ, которая позволяет:

- создать модель слоистой среды, включающую в себя размеры слоев и физические свойства материалов, в том числе: плотность, скорость распространения звука, коэффициенты затухания;
- задать параметры генерации ультразвукового импульса, включая начальный радиус пучка, длительность лазерного излучения и коэффициент поглощения света в среде генератора;
- смоделировать генерацию ультразвукового импульса;
- смоделировать распространение сгенерированного импульса в заданной слоистой среде;
- получить графическое представление временной и спектральной форм сигнала в любой точке модели среды.

Была рассмотрена следующая задача. Пусть из прозрачной среды по нормали к границе ( $z = 0$ ) с поглощающей средой падает плоская световая волна с интенсивностью  $I = I_0 f(t) H(\vec{r}_\perp)$ , где  $I_0$  — амплитудное значение интенсивности, а  $f(t)$  и  $H(\vec{r}_\perp)$  ( $\vec{r}_\perp = \{x, y\}$ ), соответственно, временная огибающая и распределение по поперечному сечению интен-

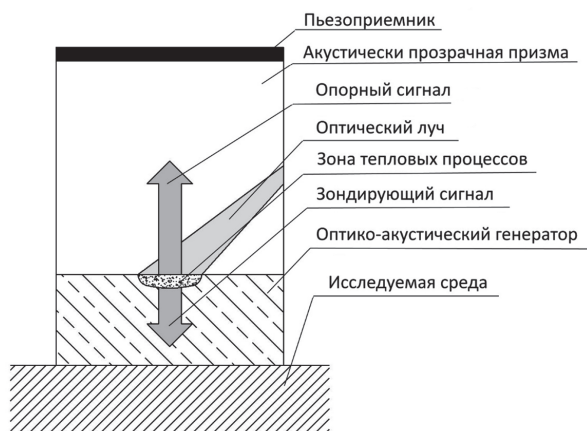


Рис. 1. Схема строения оптико-акустического датчика

Fig. 1. Structural layout of optical-acoustic sensor

сивности пучка. Без ограничения общности считаем, что временная огибающая  $f(t)$  и ее фурье-образ  $\tilde{f}(\omega)$  имеют гауссову форму:

$$\begin{cases} f(t) = \pi^{-\frac{1}{2}} \exp \left[ -\left( \frac{t}{\tau_L} \right)^2 \right], \\ \tilde{f}(\omega) = \tau_L \exp \left[ \frac{-\omega^2 \tau_L^2}{4} \right], \end{cases} \quad (1)$$

где  $\tau_L$  — характерная длительность лазерного импульса.

Для эффективного возбуждения ультразвуковой волны необходимо, чтобы в среде ОАГ было реализовано сильное поглощение оптического излучения, то есть коэффициент поглощения света  $\alpha$  должен иметь порядок  $(10^3-10^4)$  см $^{-1}$ . В этом случае ширина оптического пучка  $a$  значительно больше, чем глубина  $\alpha^{-1}$  проникновения света в среду генератора, и возможно применение метода поэтапного подхода. На первом этапе предполагается, что пространственное распределение интенсивности лазерного излучения не влияет на процесс генерации, поперечными градиентами теплового поля можно пренебречь, и возбуждается только продольная волна. Тогда процесс генерации колебательной скорости  $\tilde{v}$  частиц в продольной волне описывается системой уравнений [23]:

$$\begin{cases} c_L^{-2} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} - \Delta \tilde{v} = -\beta \left( 1 - 4 \frac{c_T^2}{3c_L^2} \right) \frac{\partial^2 T}{\partial t \partial z}, \\ \frac{\partial T}{\partial t} = \chi \Delta T + \frac{\alpha l_0}{\rho_0 c_p} f(t) H(\vec{r}_\perp) e^{-\alpha z} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $z > 0$ ;  $\chi$  — коэффициент температуропроводности;  $\beta = V^{-1}(\partial V / \partial T)_p$  — температурный коэффициент объемного расширения;  $c_p$  — удельная теплоемкость среды генератора при постоянном давлении  $p$ ;  $\rho$  и  $\rho_0$  — плотность и ее равновесное значение;  $c_L, c_T$  — скорости продольных и поперечных волн. Данную систему уравнений необходимо

дополнить граничными условиями на границе раздела  $z = 0$ , обеспечивающими непрерывность смещений и нормальных компонент скоростей. Тогда вне области нагрева

$$|z| > \max \left( \alpha^{-1}, \sqrt{(\chi_{12} / \omega)} \right)$$

(индекс 1 при коэффициенте температуропроводности относится к материалу прозрачной призмы, 2 — для среды ОАГ) существуют две чисто бегущие акустические волны. Одна из этих волн распространяется в призме и является опорной, вторая распространяется в генераторе и является зондирующей. Каждая гармоника  $\omega$  данных волн описывается выражением:

$$\tilde{v}_{12} = K_{12}(\omega) l_0 \tilde{f}(\omega) \exp(i\omega(t \pm z / c_L)), \quad (3)$$

где индекс 1 и знак «-» соответствуют опорной волне, а индекс 2 и знак «+» — зондирующей. Передаточные функции  $K_{12}(\omega)$  для каждой среды зависят от ее физико-механических и тепловых свойств. При условии, что длина диффузии тепла за время лазерного воздействия  $L_T = \sqrt{\chi \tau_0}$  значительно меньше, чем глубина его проникновения  $\alpha^{-1}$ , эти функции определяются выражениями

$$\begin{aligned} K_1(\omega) &= \frac{\beta^*}{\rho_0 c_p} \frac{N}{N+1} \frac{1}{1-i\omega/\omega_a}, \\ K_2(\omega) &= \frac{\beta^*}{\rho_0 c_p} \frac{1}{N+1} \frac{1}{1+iN\omega/\omega_a} \end{aligned}, \quad (4)$$

где  $\omega_a = \alpha c_L$ ,  $N = \rho_0 c_L / \rho_1 c_{L1}$ .

Если на первом этапе описывается процесс формирования плоских бегущих волн при лазерном возбуждении ультразвука, то на втором этапе описывается дифракционное искажение сформировавшихся акустических пучков и их распространение в слоистой среде. Предполагается, что поперечное распределение интенсивности оптического излучения имеет гауссову форму

$$H(\vec{r}_\perp) = \exp \left( -\frac{\vec{r}_\perp^2}{a^2} \right), \quad (5)$$

что соответствует основной моде генерации лазера. Тогда в однородной среде в параболическом приближении процесс дифракционного искажения гауссова пучка описывается выражением [24]:

$$\begin{aligned} \tilde{v}(\omega, \vec{r}_\perp, z) = \\ = \frac{K(\omega) I_0 \tilde{f}(\omega)}{1 + iz / L_{DF}} \exp \left[ -\frac{r_\perp^2}{a^2 (1 + iz / L_{DF})} \right], \quad (6) \end{aligned}$$

где  $L_{DF} = \omega a^2 / 2c_0 = \pi a^2 / \lambda$  — длина дифракции на частоте  $\omega$ .

Для упрощения выражения в случае многослойной среды используем метод *ABCD*-матриц, приведенный в работе [21] для оптики. Рассмотрим систему из трех плоскопараллельных слоев толщиной  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$  со скоростями продольных волн  $c_1$ ,  $c_2$  и  $c_3$  и плотностями  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  и  $\rho_3$  соответственно, в случае, когда источник находится в слое 1 (генератор), а приемник — в слое 3 (слой 2 — исследуемый объект). Также в соответствии с приближением параксиальных волн считаем, что угол отклонения от оси  $\alpha \cong \sin(\alpha) \cong \tan(\alpha)$ . Вектор колебательной скорости  $\tilde{v}$  представим через его радиальное смещение  $r$  и угол отклонения  $\alpha$  от оси. Тогда в соответствии с законами Снеллиуса смещение  $r_2$  и угол отклонения волны  $\alpha_2$  в слое 2 сразу после прохождения границы раздела 1–2 описываются следующими выражениями [21]:

$$\begin{aligned} r_2 = 1 \cdot r_0 + L_1 \cdot \alpha_0 \\ \alpha_2 = 0 \cdot r_0 + \frac{c_2}{c_1} \cdot \alpha_0, \quad (7) \end{aligned}$$

где  $r_0$  и  $\alpha_0$  — радиальное смещение и угол отклонения волны сразу после возбуждения в материале генератора, а в системе (7) учтены преобразования, возникшие как при прохождении слоя 1, так и при прохождении границы раздела 1–2.

Выражения (7) можно переписать в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & \frac{c_2}{c_1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_0 \\ \alpha_0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & \frac{c_2}{c_1} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

что и представляет собой *ABCD*-матрицу в рамках акустики. Также, если по аналогии с оптическим элементом [21] назвать акустическим элементом часть среды, производящую определенное влияние на свойства волны, получим, что рассматриваемая среда состоит из пяти элементарных акустических элементов — слоя 1, границы раздела слоев 1–2, слоя 2, границы раздела слоев 2–3 и слоя 3. Таким образом, в соответствии со свойствами *ABCD*-матриц, матрица для рассматриваемого комплексного акустического элемента 1–3 представляет собой:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L_3 + \frac{c_3}{c_2} L_2 + \frac{c_3}{c_1} L_1 \\ 0 & \frac{c_3}{c_1} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Таким же образом рассчитываются *ABCD*-матрицы для переотраженных компонент волны, что учитывается в разработанном алгоритме. Возвращаясь к рассматриваемому примеру, заметим, что формула (9) является частным случаем общей формулы для гауссова пучка в среде, которая может быть описана *ABCD*-матрицей в параксиальном приближении для гауссова распределения интенсивности в поперечном сечении [21, 22]:

$$\begin{aligned} u(\vec{r}_\perp, z) = \\ = \frac{1}{A + B / q_1} \exp \left[ -ik \frac{r_\perp^2}{2q_0} \right], \quad (11) \end{aligned}$$

где  $q_0$  — комплексный параметр гауссова пучка сразу после выхода из области генерации, а  $q_1$  — комплексный

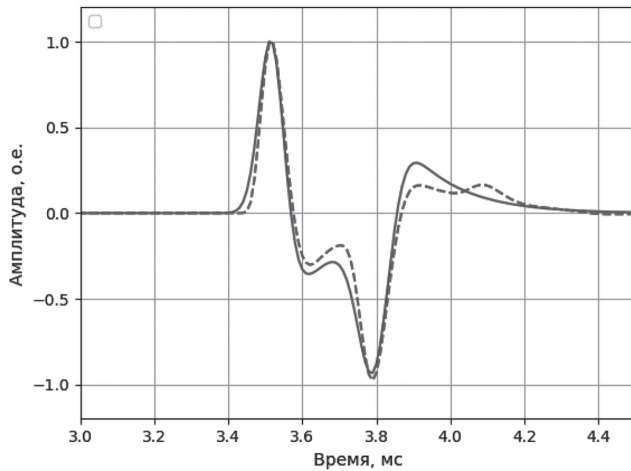


Рис. 2. Временная форма сигнала с датчика от свободной поверхности (воздуха)  
 Fig. 2. Temporal shape of signal from sensor on free surface (air)

параметр гауссова пучка после полного прохождения акустического элемента. В соответствии с [21]  $q_0$  и  $q_1$  связаны законом  $ABCD$  распространения гауссовых пучков:

$$q_0 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}, \quad (12)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  – соответствующие элементы матрицы, описывающей акустический элемент с любым числом слоев. Выражение для начального значения комплексного параметра  $q_0$  [24]:

$$q_0 = \frac{i\omega a^2}{2c_1}. \quad (13)$$

Коэффициент отражения по колебательной скорости плоской продольной волны, падающей перпендикулярно к границам раздела сред 1 и 2 из среды 1:

$$R_v = \frac{v_{1,omp}}{v_1} = \frac{\left(1 - \frac{Z_1}{Z_2}\right)}{\left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right)}, \quad (14)$$

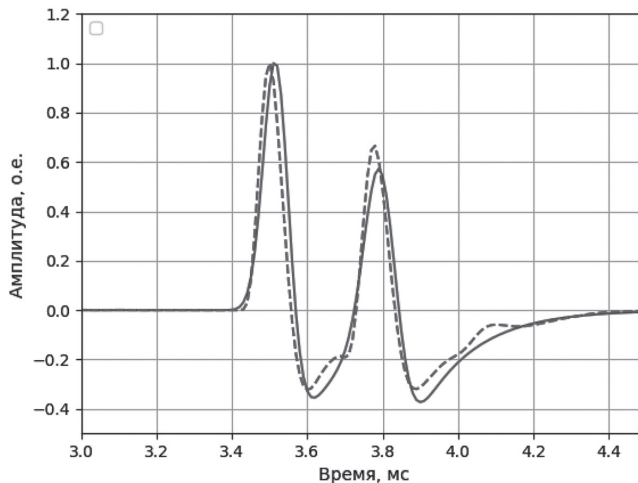


Рис. 3. Временная форма сигнала с датчика от стальной пластины  
 Fig. 3. Temporal shape of signal from sensor on steel plate

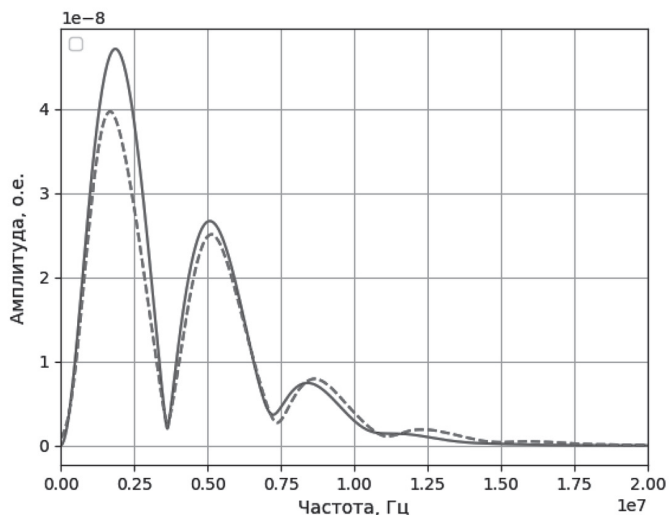


Рис. 4. Спектральная форма сигнала с датчика от свободной поверхности (воздуха)  
 Fig. 4. Spectrum of signal from sensor on free surface (air)

где  $Z_1 = \rho_1 c_1$ ,  $Z_2 = \rho_2 c_2$  – акустические импедансы генератора (слой 1) и исследуемого объекта (слой 2).

Коэффициент прохождения по колебательной скорости плоской продольной волны, падающей перпендикулярно к границам раздела сред:

$$T_v = \frac{v_2}{v_1} = \frac{2}{(1 + Z_1 / Z_2)}. \quad (15)$$

Для трех сред:

$$T_v = T_{v,2 \rightarrow 3} \cdot T_{v,1 \rightarrow 2} = \frac{4}{\left(1 + \frac{Z_3}{Z_2}\right) \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right)}, \quad (16)$$

где  $Z_3$  – акустический импеданс приемника (слой 3).

Подставляя это выражение в (6) получаем формулу:

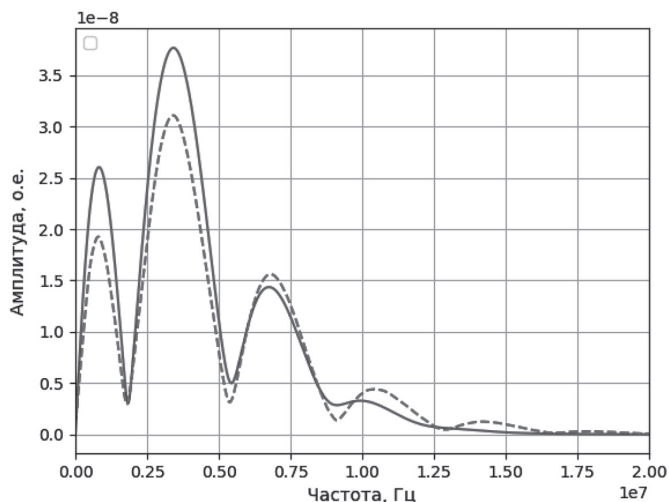


Рис. 5. Спектральная форма сигнала с датчика от стальной пластины  
 Fig. 5. Spectrum of signal from sensor on steel plate



$$\tilde{v}(\omega, \vec{r}_\perp, z) = \frac{K(\omega)I_0\tilde{f}(\omega) \frac{4}{\left(1 + \frac{Z_3}{Z_2}\right)\left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right)}}{1 + \left(L_3 + \frac{c_3}{c_2}L_2 + \frac{c_3}{c_1}L_1\right) \frac{2ic_1}{\omega a^2}} \exp\left[-\frac{r_\perp^2}{a^2} \frac{\frac{c_3}{c_1}}{1 + \left(L_3 + \frac{c_3}{c_2}L_2 + \frac{c_3}{c_1}L_1\right) \frac{2ic_1}{\omega a^2}}\right], \quad (17)$$

Таким образом, поле на оси ( $r_\perp = 0$ ) дается выражением:

$$\tilde{v}(\omega, z) = \frac{\frac{\beta^* - i\omega / \omega_a}{\rho_1 c_{p1} + (\omega / \omega_a)^2} \frac{AE_p}{\pi a^2} \exp\left[-\frac{\omega^2 \tau_L^2}{4}\right] \frac{4}{\left(1 + \frac{Z_3}{Z_2}\right)\left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right)}}{1 + \left(L_3 + \frac{c_3}{c_2}L_2 + \frac{c_3}{c_1}L_1\right) \frac{2ic_1}{\omega a^2}}. \quad (18)$$

### Результаты

На рис. 2, 3 изображены: пунктирными линиями — временные формы сигналов, полученные экспериментальным способом, сплошными линиями — временные формы смоделированных описанным выше методом сигналов. На рис. 4, 5 — спектральные формы.

Как видно из рис. 2 — 5, смоделированные сигналы близки к экспериментальным, а отклонения этих сигналов обусловлены различием реальных физико-механических свойств сред и свойств сред, заданных в программе моделирования.

### Заключение

В ходе исследования методов моделирования распространения ультразвуковых пучков в слоистых средах была выявлена необходимость в разработке для описания процесса распространения акустических сигналов в слоистой среде метода *ABCD*-матриц, характери-

зующегося более быстрым процессом расчета модели. Для реализации данного метода была создана компьютерная программа на языке Python. Результатом работы программы являются графические представления временной и спектральной форм сигнала в любой точке анализируемой среды. Средства, представленные в программе, позволяют настраивать физические параметры среды и генерации сигнала, что дает результаты, близкие полученным экспериментально.

Программа может использоваться для моделирования лазерной генерации и распространения акустических сигналов в любых плоскопараллельных слоистых средах, причем моделирование распространения возможно для любого заранее заданного сигнала.

На данный момент ведутся работы по решению обратной задачи — определению параметров среды из данных эксперимента с использованием разработанной программы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров В. Г. Улучшение качества изображений в компьютерной томографии с помощью интегрального преобразования специального вида // Компьютерные исследования и моделирование. — 2015. — Т. 7. — № 5. — С. 1033 — 1046.

2. Демьянов А. Ю., Динариев О. Ю., Лисицын Д. А. Моделирование частотной зависимости диэлектрической проницаемости и электрической проводимости насыщенных по-



ристых сред // Компьютерные исследования и моделирование. — 2016. — Т. 8. — № 5. — С. 765–773.

3. Демьянов А. Ю., Динариев О. Ю., Лисицын Д. А. Метод расчета электрических свойств насыщенных горных пород, учитывающий поверхностную проводимость // Компьютерные исследования и моделирование. — 2015. — Т. 7. — № 5. — С. 1081–1088.

4. Вавилов В. П. Тепловидение и тепловой контроль для инженеров. — М.: Спектр, 2017. — 72 с.

5. Bychkov A. S., Zarubin V. P., Karabutov A. A., Simonova V. A., Cherepetskaya E. B. On the use of an optoacoustic and laser ultrasonic imaging system for assessing peripheral intravenous access // Photoacoustics. 2017. Vol. 5. Pp. 10–16.

6. Karabutov A. A., Podymova N. B., Cherepetskaya E. B. Measuring the dependence of the local Young's modulus on the porosity of isotropic composite materials by a pulsed acoustic method using a laser source of ultrasound // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2013. Vol. 54. No 3. Pp. 500–507.

7. Kravcov A., Shibaev I. A., Blokhin D. I., Krapivnoi M. M., Zarubin V. P. Examination of structural members of aerial vehicles by laser ultrasonic structuroscopy // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. No 11. Pp. 2258–2265.

8. Bychkov A., Siminova V., Zarubin V., Cherepetskaya E., Karabutov A. The progress in photoacoustic and laser ultrasonic tomographic imaging for biomedicine and industry. A review // Applied Sciences (Switzerland). 2018. Vol. 8. No 10.

9. Takahashi S., Kobayashi S., Tomas I., Dupre L., Vertesy G. Comparison of magnetic non-destructive methods applied for inspection of steel degradation // NDT & E International. 2017. Vol. 91. Pp. 54–60.

10. Velicheti D., Nagy P. B., Hassan W. Inversion procedure for dual-mode electromagnetic nondestructive characterization of shot-peened IN718 // NDT & E International. 2019. Vol. 101. Pp. 17–28.

11. Mottershead J. E., Friswell M. I. Model updating in structural dynamics: a survey // Journal of Sound and Vibration. 1993. Vol. 167. Pp. 347–375. DOI: 10.1006/jsvi.1993.1340.

12. Friswell M. I., Mottershead J. E. Finite element model updating in structural dynamics. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 1995. 286 p.

13. Zou Y., Tong L., Steven G. P. Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures — a review // Journal of Sound and Vibration. 2000. Vol. 230. No 2. Pp. 357–378. DOI: 10.1006/jsvi.1999.2624.

14. Sinha J. K., Friswell M. I., Edqards S. Simplified models for the location of cracks in beam structures using measured vibration data // Journal of Sound and Vibration. 2002. Vol. 251. Pp. 13–38.

15. Liu G. R., Han X. Computational inverse techniques in nondestructive evaluation. CRC Press, Boca Raton, FL. 2003. 592 p.

16. Taheri H., Koester L. W., Bigelow T. A., Bond L. J. Thermoelastic finite element modeling of laser generated ultrasound in additive manufacturing materials // ASNT Annual Conference 2017. Pp. 188–198.

17. Фаворская А. В. Исследование свойств материала пластины лазерным ультразвуком при помощи анализа кратных волн // Компьютерные исследования и моделирование. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 653–673.

18. Sun H., Waisman H., Betti R. A sweeping window method for detection of flaws using an explicit dynamic XFEM and absorbing boundary layers // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2015. Vol. 105. No 13. Pp. 1014–1040.


19. Gravenkamp H., Natarajan S., Dornisch W. On the use of NURBS-based discretizations in the scaled boundary finite element method for wave propagation problems // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2017. Vol. 315. Pp. 867–880.

20. Jung J., Jeong C., Taciroglu E. Identification of a scatterer embedded in elastic heterogeneous media using dynamic XFEM // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2013. Vol. 259. Pp. 50 – 63.

21. Звелто О. Принципы лазеров. – СПб.: Лань, 2008. – 720 с.

22. Gerrard A., Burch J. Introduction to matrix methods in optics. London: Wiley, 1975. 384 p.

23. Гусев В. Э., Карабутов А. А. Лазерная оптоакустика. – М.: Наука, 1991. – 304 с.

24. Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П. Теория волн. – М.: Наука, 1979. – 432 с. 

## REFERENCES

1. Nazarov V.G. Improvement of imaging quality in computer tomography using special integral transform. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*. 2015, vol. 7, no 5, pp. 1033 – 1046. [In Russ].

2. Dem'yanov A. Yu., Dinariev O. Yu., Lisitsyn D.A. Modeling frequency dependence of dielectric permeability and electrical conductance of saturated porous media. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*. 2016, vol. 8, no 5, pp. 765 – 773. [In Russ].

3. Dem'yanov A. Yu., Dinariev O. Yu., Lisitsyn D.A. Method to calculate electrical properties of saturated rocks with regard to surface conductance. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*. 2015, vol. 7, no 5, pp. 1081 – 1088. [In Russ].

4. Vavilov V.P. *Teplovidenie i teplovoy kontrol' dlya inzhenerov* [Thermal imaging and heat control for engineers], Moscow, Spektr, 2017, 72 p.

5. Bychkov A. S., Zarubin V. P., Karabutov A. A., Simonova V. A., Cherepetskaya E. B. On the use of an optoacoustic and laser ultrasonic imaging system for assessing peripheral intravenous access. *Photoacoustics*. 2017. Vol. 5. Pp. 10 – 16.

6. Karabutov A. A., Podymova N. B., Cherepetskaya E. B. Measuring the dependence of the local Young's modulus on the porosity of isotropic composite materials by a pulsed acoustic method using a laser source of ultrasound. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2013. Vol. 54. No 3. Pp. 500 – 507.

7. Kravcov A., Shibaev I. A., Blokhin D. I., Krapivnoi M. M., Zarubin V. P. Examination of structural members of aerial vehicles by laser ultrasonic structuroscopy. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018. Vol. 9. No 11. Pp. 2258 – 2265.

8. Bychkov A., Siminova V., Zarubin V., Cherepetskaya E., Karabutov A. The progress in photoacoustic and laser ultrasonic tomographic imaging for biomedicine and industry. A review. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2018. Vol. 8. No 10.

9. Takahashi S., Kobayashi S., Tomas I., Dupre L., Vertesy G. Comparison of magnetic non-destructive methods applied for inspection of steel degradation. *NDT & E International*. 2017. Vol. 91. Pp. 54 – 60.

10. Velicheti D., Nagy P. B., Hassan W. Inversion procedure for dual-mode electromagnetic nondestructive characterization of shot-peened IN718. *NDT & E International*. 2019. Vol. 101. Pp. 17 – 28.

11. Mottershead J. E., Friswell M. I. Model updating in structural dynamics: a survey. *Journal of Sound and Vibration*. 1993. Vol. 167. Pp. 347 – 375. DOI: 10.1006/jsvi.1993.1340.

12. Friswell M. I., Mottershead J. E. *Finite element model updating in structural dynamics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 1995. 286 p.

13. Zou Y., Tong L., Steven G. P. Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures – a review. *Journal of Sound and Vibration*. 2000. Vol. 230. No 2. Pp. 357 – 378. DOI: 10.1006/jsvi.1999.2624.

14. Sinha J. K., Friswell M. I., Edqards S. Simplified models for the location of cracks in beam structures using measured vibration data. *Journal of Sound and Vibration*. 2002. Vol. 251. Pp. 13 – 38.

15. Liu G. R., Han X. *Computational inverse techniques in nondestructive evaluation*. CRC Press, Boca Raton, FL. 2003. 592 p.
16. Taheri H., Koester L. W., Bigelow T. A., Bond L. J. Thermoelastic finite element modeling of laser generated ultrasound in additive manufacturing materials. *ASNT Annual Conference 2017*. Pp. 188 – 198.
17. Favorskaya A. V. Laser ultrasonic investigation of properties of a plate material through the analysis of multiple waves. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovaniye*. 2019, vol. 11, no 4, pp. 653 – 673. [In Russ].
18. Sun H., Waisman H., Betti R. A sweeping window method for detection of flaws using an explicit dynamic XFEM and absorbing boundary layers. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2015. Vol. 105. No 13. Pp. 1014 – 1040.
19. Gravenkamp H., Natarajan S., Dornisch W. On the use of NURBS-based discretizations in the scaled boundary finite element method for wave propagation problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2017. Vol. 315. Pp. 867 – 880.
20. Jung J., Jeong C., Taciroglu E. Identification of a scatterer embedded in elastic heterogeneous media using dynamic XFEM. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2013. Vol. 259. Pp. 50 – 63.
21. Zvelto O. *Printsipy lazerov* [Principles of lasers], Saint-Petersburg, Lan', 2008, 720 p.
22. Gerrard A., Burch J. *Introduction to matrix methods in optics*. London: Wiley, 1975. 384 p.
23. Gusev V. E., Karabutov A. A. *Lazernaya optoakustika* [Laser opto-acoustics], Moscow, Nauka, 1991, 304 p.
24. Vinogradova M. B., Rudenko O. V., Sukhorukov A. P. *Teoriya voln* [Theory of waves], Moscow, Nauka, 1979, 432 p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пашкин Александр Игоревич<sup>1</sup> – инженер,  
e-mail: Alexandrill@ya.ru,

Винников Владимир Александрович<sup>1</sup> – д-р физ.-мат. наук,  
доцент, зав. кафедрой, e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com,  
<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС».

**Для контактов:** Винников В.А.,  
e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A. I. Pashkin<sup>1</sup>, Engineer, e-mail: Alexandrill@ya.ru,  
V. A. Vinnikov<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Assistant Professor,  
Head of Chair, e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com,

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISIS»,  
119049, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** V. A. Vinnikov,  
e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com.

Получена редакцией 24.03.2020; получена после рецензии 09.04.2020; принята к печати 20.05.2020.  
Received by the editors 24.03.2020; received after the review 09.04.2020; accepted for printing 20.05.2020.

