

## ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ЛИСТОВ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА НА ПРОХОЖДЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ

© 2024 г. О.В. Муравьева<sup>1,2,\*</sup>, Л.А. Денисов<sup>1</sup>, О.П. Богдан<sup>1</sup>, А.В. Блинова<sup>1</sup>

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

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

Поступила в редакцию 20.10.2024; после доработки 25.10.2024

Принята к публикации 25.10.2024

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

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

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

© 2024 O. V. Muravieva<sup>1,2,\*</sup>, L. A. Denisov<sup>1</sup>, O. P. Bogdan<sup>1</sup>, A. V. Blinova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia 426069 Izhevsk, Studencheskaya St., 7

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

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

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

**DOI:** 10.31857/S0130308224120047

## ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

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

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

Таблица 1

## Характеристики образцов ТРГ

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

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

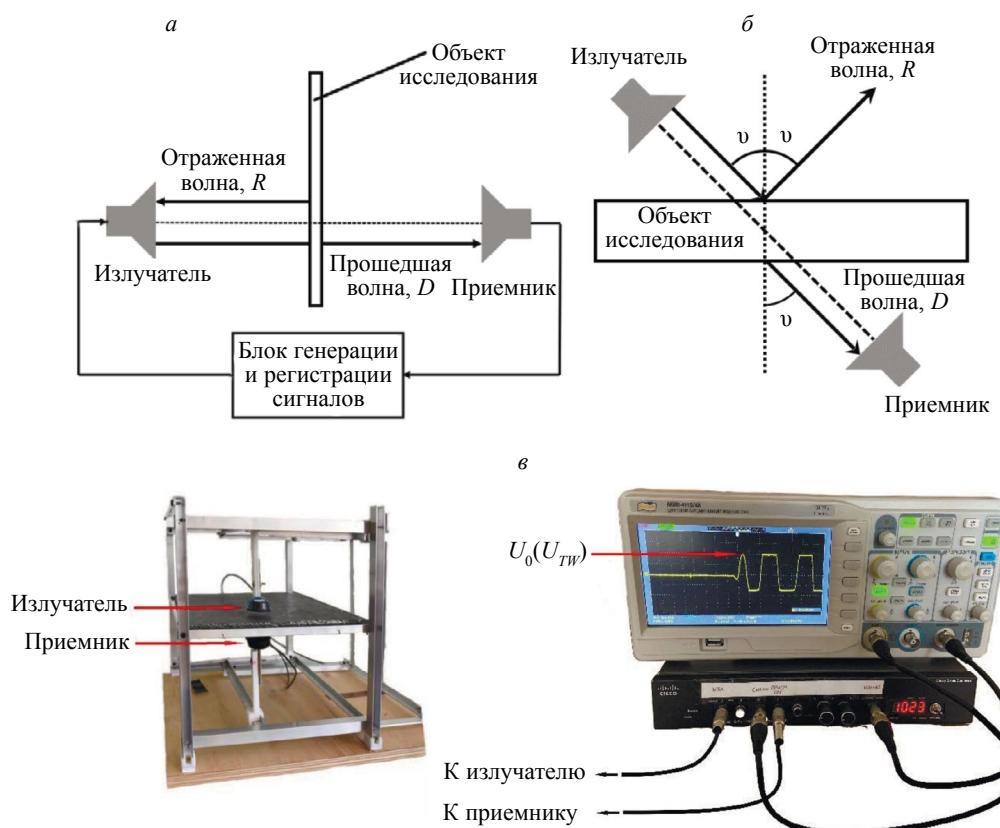


Рис. 1. Схема определения коэффициента прозрачности по нормали (а) и под углом к поверхности (б); фото установки (в).

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

Основные технические характеристики установки представлены в табл. 2.

Таблица 2  
Основные технические характеристики экспериментальной установки

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

Коэффициент прохождения  $D$  определяется согласно формуле:

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

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

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

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

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

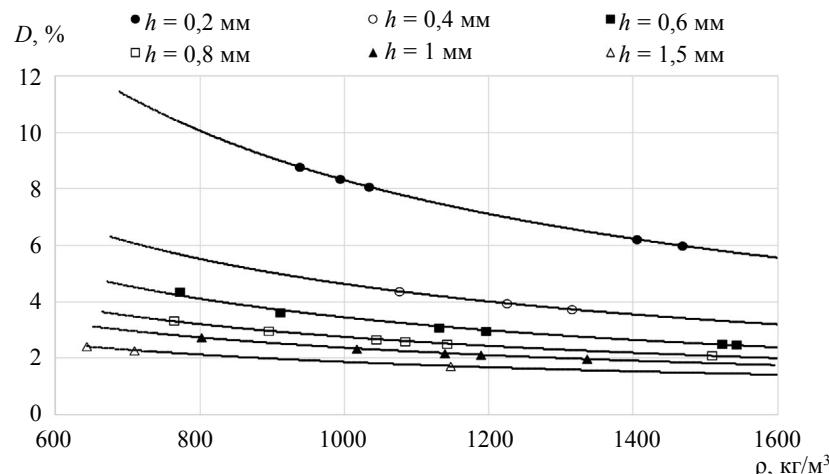


Рис. 2. Экспериментальные зависимости коэффициента прозрачности от плотности листа при его различной толщине.

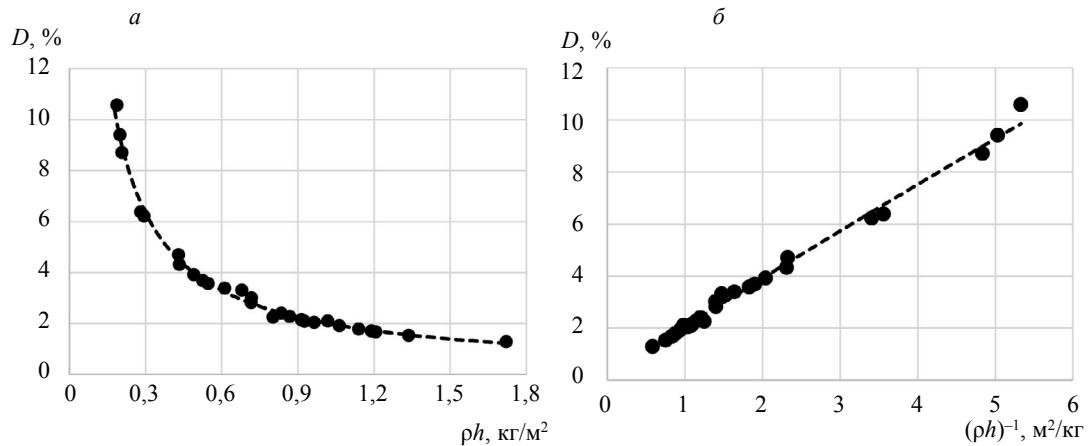


Рис. 3. Экспериментальная зависимость коэффициента прозрачности от поверхностной плотности (*a*); от обобщенного параметра (*б*).

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

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

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

На поведение кривой коэффициента прозрачности оказывают влияние два основных фак-

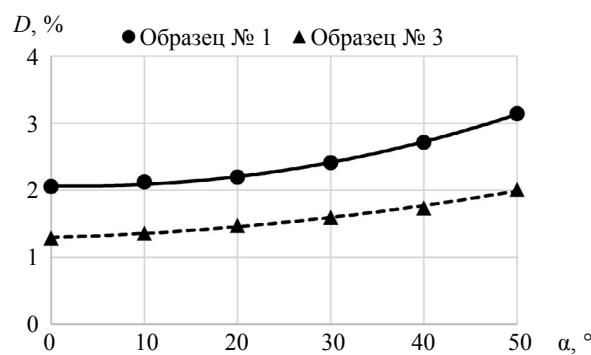


Рис. 4. Экспериментальные зависимости коэффициента прозрачности от угла ввода для образцов № 1 и № 3.

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

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

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

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

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

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

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

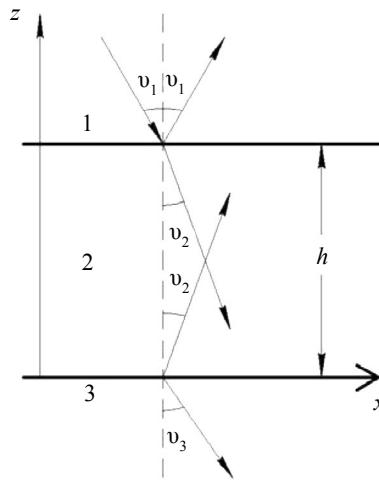


Рис. 5. Постановка задачи о прохождении плоской волны через тонкий слой.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

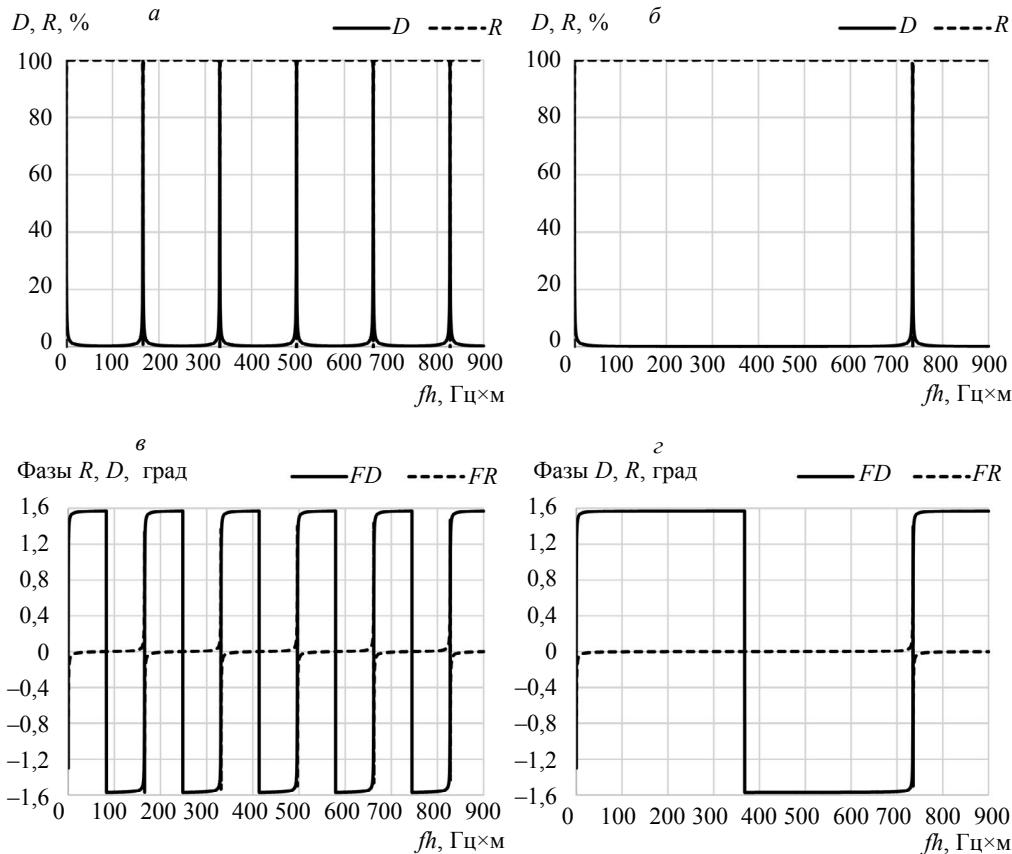


Рис. 6. Зависимость амплитуд ( $a, \delta$ ) и фаз ( $\varepsilon, \varepsilon$ ) коэффициентов прозрачности  $D$  и отражения  $R$  от  $f h$  для образца № 1 при скорости  $C_2 = 330 \text{ м/с}$  ( $a, \delta$ ) и скорости  $C_2 = 1470 \text{ м/с}$  ( $\varepsilon, \varepsilon$ ).

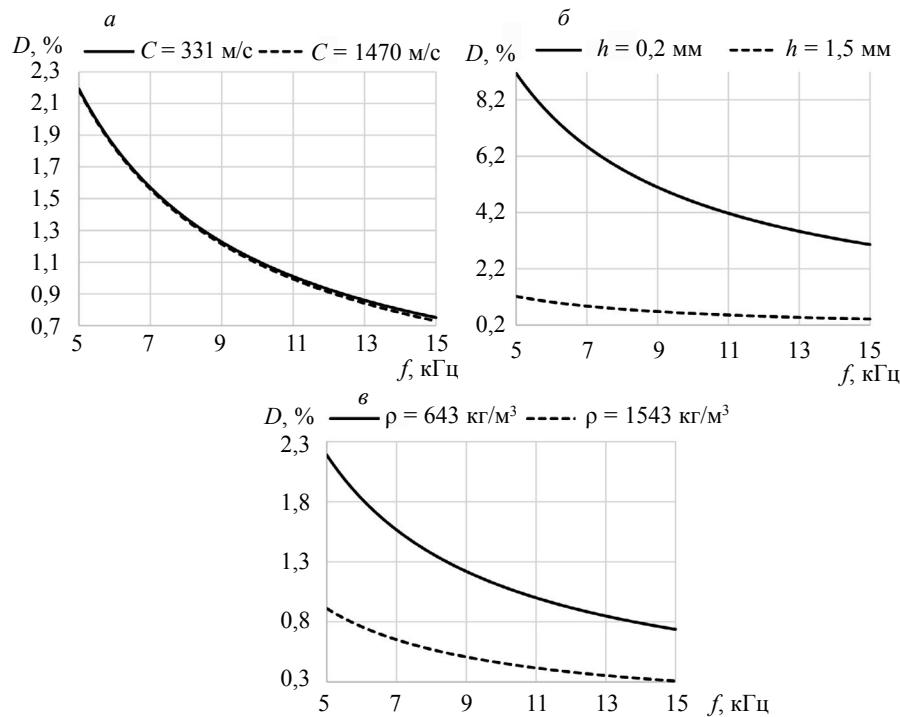


Рис. 7. Зависимость коэффициента прозрачности от частоты при изменении скорости  $C_l$  ( $\rho = 643 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $h = 1,5 \text{ мм}$ ) (α); при изменении толщины образца ( $C_l = 500 \text{ м}/\text{с}$ ,  $\rho = 1147 \text{ кг}/\text{м}^3$ ) (β); при изменении плотности образца ( $C_l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

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

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

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

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

малой базой прозвучивания и неравномерностью толщины стенки листа;

невозможностью надежного позиционирования измерительного инструмента на легко деформируемой поверхности;

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

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

В отличие от скорости волны изменение плотности, как и изменение толщины листа ТРГ, оказывает существенное влияние на коэффициент прозрачности в исследуемом диапазоне частот (рис. 7β, γ). Так, на частоте 6,5 кГц увеличение толщины с 0,2 до 1,5 мм ведет к уменьшению коэффициента прозрачности с 7 до 1 % (см. рис. 7β). Рост плотности в диапазоне значений от 643 до 1543 кг/м<sup>3</sup> ведет к уменьшению коэффициента прозрачности с 4,2 до 1,8 % (см. рис. 7γ).

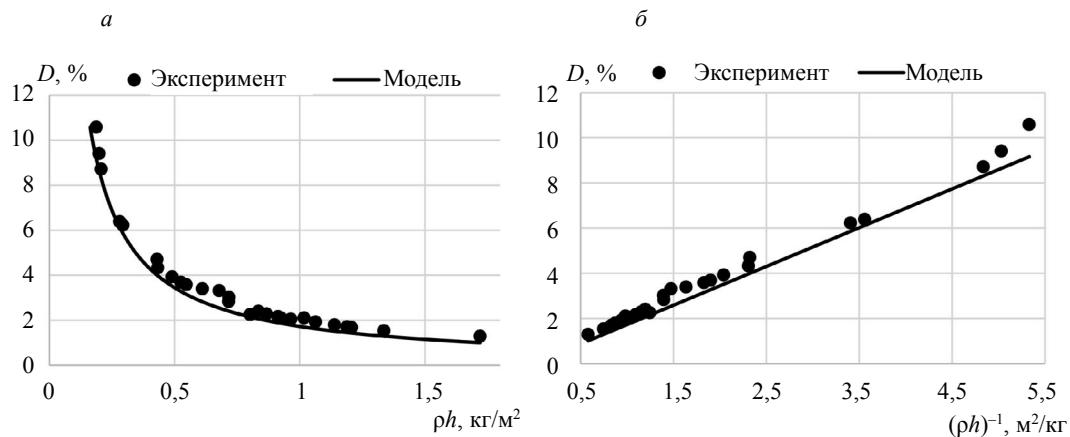


Рис. 8. Теоретическая зависимость коэффициента прозрачности от поверхностной плотности  $\rho h$  (а); от  $(\rho h)^{-1}$  (б).

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

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

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

Таблица 3

Уравнения линий тренда теоретических и экспериментальных зависимостей коэффициента прозрачности от  $\rho h$

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

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

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

При определении коэффициента прозрачности через тонкие листы важно оценить влияние углового перекоса листа относительно акустической оси, что определяет достоверность контроля плотности листа. С этой целью теоретически исследовано влияние угла падения  $\alpha$  акустической волны на тонкий лист на примере двух образцов фиксированной толщины (1,5 мм) и разной плотности (643 и 1147 кг/м<sup>3</sup>). Представленные на рис. 9 зависимости коэффициента прозрачности от угла падения показывают, что значение  $D$  увеличивается с ростом угла, при этом в области малых углов изменение  $D$  не существенно (не превышает 2 % в диапазоне углов от 0 до 10 град) и более существенно для больших диапазонов углов: при угле 50 град отклонение коэффициента прозрачности может достигать 35 % от начального значения (0 град).

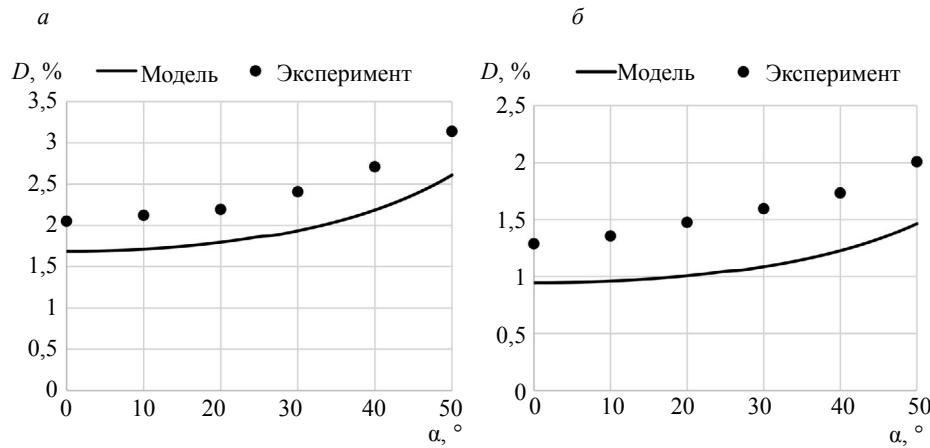


Рис. 9. Теоретическая зависимость коэффициента прозрачности от угла падения для образцов № 1 и № 3.

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

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

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

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

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

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

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

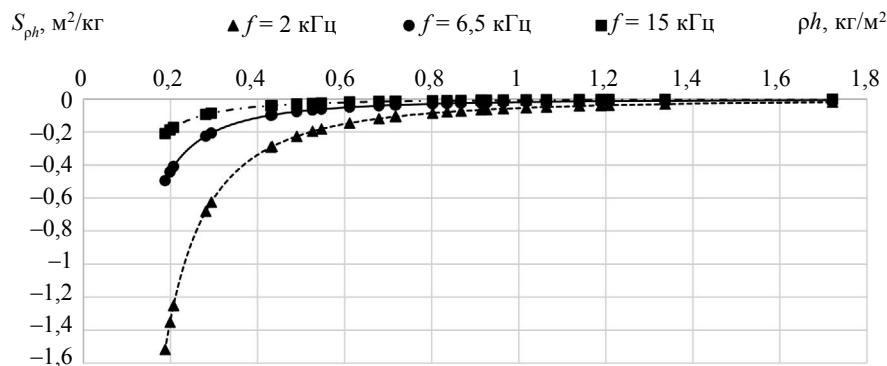


Рис. 10. Теоретическая зависимость чувствительности  $S_D$  коэффициента прозрачности к поверхностной плотности  $ph$  в различных частотных диапазонах.

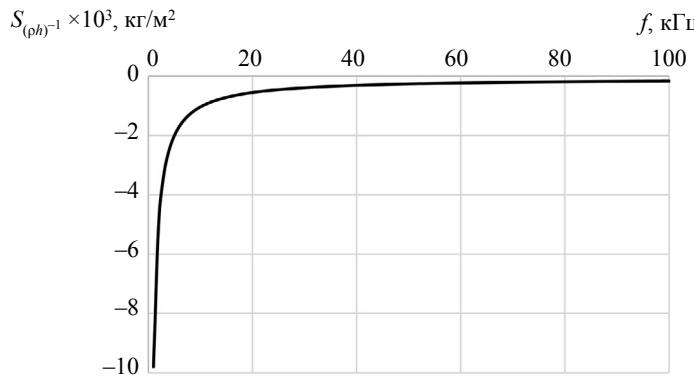


Рис. 11. Теоретическая зависимость чувствительности коэффициента прозрачности к поверхностной плотности  $(\rho h)^{-1}$  от частоты.

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

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

Результаты экспериментальных измерений коэффициента прозрачности были сопоставлены с данными по плотности, полученными в ходе верификации прямым весовым методом [29]. Толщина листа  $h$  варьировалась в диапазоне от 1,03 до 1,08 мм и плотность  $\rho$  — в диапазоне от 980 до 1130 кг/м<sup>3</sup>. Экспериментальная чувствительность к изменению по плотности относительно амплитуды сигнала эталонного в условиях линейного приближения составила:

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

Используя график зависимости коэффициента прозрачности от поверхностной плотности (см. рис. 10), для частоты 6,5 кГц найдем изменение коэффициента прозрачности  $\Delta D$  (эквивалентное изменению амплитуды сигнала  $\Delta U$ ), соответствующее изменению поверхностной плотности  $\rho h$  от 1,0 до 1,22 кг/м<sup>2</sup>:  $\Delta D = 0,32$ . При толщине  $h = 1$  мм это изменение соответствует

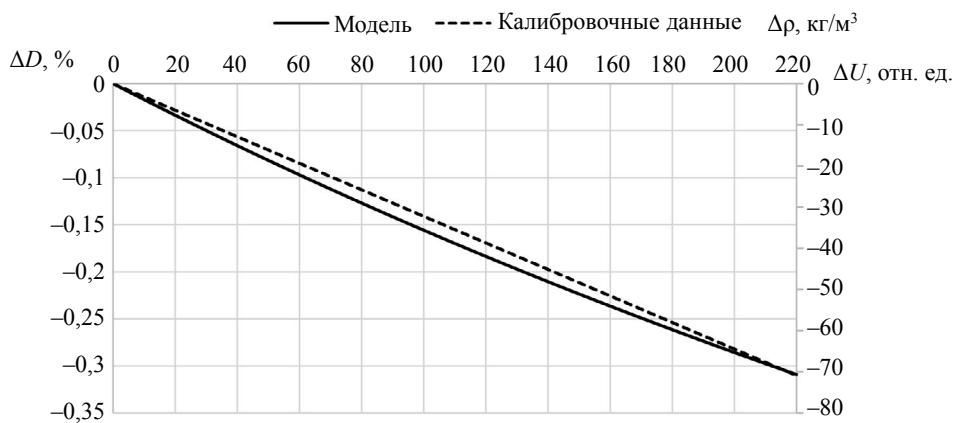


Рис. 12. Зависимости изменения амплитуды  $\Delta U$  прошедшего сигнала, полученного при калибровке (формула (12)), и изменения коэффициента прозрачности  $\Delta D$ , полученного при моделировании от изменения плотности  $\Delta \rho$ .

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

## ВЫВОДЫ

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

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

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

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

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

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

11. Богдан О.П., Муравьева О.В., Платунов А.В., Рысев Д.С. Исследование характеристик листов пенополиэтилена акустическими методами // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2020. Т. 23. № 2. С. 61—68. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-61-68. EDN RNJUOD.
12. Федотовский В.С. Пористая среда как акустический метаматериал с отрицательными инерционными и упругими свойствами // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 5. С. 547—553. DOI: 10.1134/S0320791918050027. EDN UWWHVP.
13. Horoshenkov K., Hurrell A., Groby J.-P. Erratum: A three-parameter analytical model for the acoustical properties of porous media // J. Acoust. Soc. Am. 2019. V. 145 (4). P. 2512—2517. DOI: 10.1121/10.0000560
14. Zhang W., Mehrabian A. Связь поромеханики и адсорбции в мультипористых твердых телах // Физ. мезомех. 2023. Т. 26. № 2. С. 43—56. DOI: 10.55652/1683-805X\_2023\_26\_2\_43. EDN LYEEKU.
15. Фоменко С.И., Джана Р.Б., Ромашин А.К. Моделирование распространения упругих волн в двухфазной пористо-упругой среде и определение эффективных модулей с помощью поверхностных волн / Математическое моделирование в естественных науках. Материалы XXXI Всероссийской школы-конференции. Пермь, 05—08 октября 2022 года. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2022. Т. 1. С. 308—310. EDN LYMNNAZ.
16. Kidner M., Hansen C. A comparison and review of theories of the acoustics of porous materials // International Journal of Acoustics and Vibrations. 2008. V. 13. P. 1—27.
17. Леньков С.В. Акустические поверхностные волны в пористо-упругих двухфазных средах // Химическая физика и мезоскопия. 2023. Т. 25. № 3. С. 375—384. DOI: 10.15350/17270529.2023.3.33. EDN PBCENE.
18. Ильясов Х.Х., Кравцов А.В., Кузнецов С.В., Секердж-Зенькович С.Я. Об особенностях акустических волн в средах с большими значениями пористости в рамках теории Био // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 6. С. 665—669. DOI: 10.7868/S0320791917060041. EDN ZIEVFB.
19. Zhang L., Ba J., Carcione J.M. Wave propagation in infinitupleporosity media // J. Geophy Res: Solid Earth. 2021. V. 126. № 4. DOI: 10.1029/2020JB021266
20. Ситникова Л.Ф., Гималтдинов И.К. Задача о распространении акустических волн в пористой среде, насыщенной пузырьковой жидкостью // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2021. Т. 13. № 1. С. 59—66. DOI: 10.14529/mmp210107. EDN QVHMWD.
21. Li J.X., Rezaee R., Muller T.M. Wettability effect on wave propagation in saturated porous medium // J. Acoust. Soc. Am. 2020. V. 147. P. 911—920. DOI: 10.1121/10.0000616
22. Venegas R., Zielinski T. G., Nunez G., Becot F.-X. Acoustics of porous composites // Composites Part B Engineering. 2021. V. 220. 109006 p. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109006
23. Tao L. Porosity reconstruction based on Biot elastic model of porous media by homotopy perturbation method // Chaos, Solitons & Fractals. 2022. V. 158. 112007 p. DOI: 10.1016/j.chaos.2022.112007
24. Goyal S., Bhagwan J., Tomar S.K. Elastic waves at the plane interface of swelling porous half-space and viscoelastic half-space with voids // Int. J. Mech. Sci. 2020. V. 188. 105942 p. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105942
25. Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю., Дудко Д.Н. Взаимодействие акустических волн с пористым слоем // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16. № 3. С. 455—470. EDN KTOLRN.
26. Голуб М.В., Дорошенко О.В., Оконешникова Е.А., Фоменко С.И. Моделирование распространения упругих волн в слоистом периодическом композите с дважды периодическим массивом интерфейсных отслоений произвольной формы // Математическое моделирование в естественных науках. 2022. Т. 1. С. 71—74. EDN KYBHPB.
27. Исаев О.Ю., Смирнов Д.В., Лепихин В.П., Белова М.Ю., Колесова С.М. Технология и аппаратурное оформление процесса производства уплотнительных материалов из терморасширенного графита // Конструкции из композиционных материалов. 2006. № 4. С. 76—79. EDN JZGEQJ.
28. Котов С.А., Музафарова С.-В.Р., Ливинцова М.Г. Исследование процессов уплотнения порошков терморасширенного графита при прокатке // Заготовительные производства в машиностроении. 2019. Т. 17. № 8. С. 366—370. EDN XHGSSI.
29. Богдан О.П., Муравьева О.В., Блинова А.В., Злобин Д.В. Исследование плотности образцов из терморасширенного графита акустическим амплитудно-теневым методом // Дефектоскопия. 2023. № 8. С. 21—31. DOI: 10.31857/S0130308223080031. EDN DYTIAAG.
30. Секоян С.С., Шлегель В.Р., Бацанов С.С., Гаврилкин С.М., Поярков К.Б., Гурков А.А., Дуров А.А. Влияние пористости и дисперсности материалов на скорость распространения звуковых волн // Прикладная механика и техническая физика. 2009. Т. 50. № 4 (296). С. 121—127. EDN: KVDCIF
31. Кравцов А.В., Шорникова О.Н., Булыгина А.И., Соловьев А.Б., Кустов А.Л., Авдеев В.В. Исследование пористой структуры терморасширенного графита, полученного из нитрата высококоориентированного пиролитического графита // Журнал физической химии. 2023. Т. 97. № 6. С. 827—835. DOI: 10.31857/S0044453723060122. EDN: LJQQW.
32. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. 2-е изд. дополненное и переработанное. М.: Наука, 1973. 340 с.
33. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. Пер. с нем. / Под ред. В. С. Григорьева и Л. Д. Розенберга. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. 726 с.

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

## REFERENCES

1. Biot M.A. Acoustics, elasiticity, and thermodynamics of porous media: twenty-one papers. New York: Acoustical Society of America, 1992. 265 p.
2. Gubaidullin A.A., Boldyreva O.Yu., Dudko D.N. Velocity and attenuation of linear waves in porous media saturated with gas and its hydrate // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2022. V. 63. No. 4 (374). P. 56—63. DOI: 10.1134/s002189442204006x. EDN PQARJW.
3. Yang Q., Malcolm A., Rusmanugroho H., Mao W. Analysis of radiation patterns for optimized full waveform inversion in fluid-saturated porous media // Geophysical Journal International. 2019. V. 216. № 3. P. 1919—1937. DOI: 10.1093/gji/ggy525
4. Sivanantham M., Thyla P., Loganathan P., Sathish S. Measuring Methods of Acoustic Properties and Influence of Physical Parameters on Natural Fibers: A Review // Journal of Natural Fibers. 2019. V. 17. № 12. P. 1—20. DOI: 10.1080/15440478.2019.1598913
5. Zhao H., Wang Y., Yu D., Yang H., Zhong J., Wu F., Wen J. A double porosity material for low frequency sound absorption // Composite Structures. 2020. V. 239. 111978 p. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111978
6. Oh J.-H., Kim J.-S., Nguyen V.-H., Oh I.-K. Auxetic graphene oxide-porous foam for acoustic wave and shock energy dissipation // Composites Part B: Engineering. 2020. V. 186. 107817 p. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107817
7. Gubaidullin D.A., Fedorov Y.V. Peculiarities of Acoustic Wave Reflection from a Boundary or Layer of a Two-Phase Medium // Acoustical Physics. 2018. V. 64. No. 2. P. 164—174. DOI: 10.1134/S1063771018020057. EDN XXNDJB.
8. Dmitriev V.L., Ponomareva E.A. Rasprostranenie akusticheskikh voln v sloistykh poristykh sredakh / Trudy Instituta mekhaniki UNTs RAN. Ufa: Gilem, 2007. P. 169—175.
9. Jimenez N., Umnova O., Groby J.-P. Acoustic Waves in Periodic Structures, Metamaterials, and Porous Media: From Fundamentals to Industrial Applications. Topics in Applied Physics. Springer, 2021. 444 p.
10. Bogdan O.P., Zlobin D.V., Murav'eva O.V., Molin S.M., Platunov A.V. Evaluation of nonuniformity of elastic properties of sheets made from closed-cell polyolefin foams by acoustic method // Devices and Methods of Measurements. 2021. T. 12. № 1. C. 58—66. DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-1-58-66. EDN AKZRSR.
11. Bogdan O.P., Murav'eva O.V., Platunov A.V., Risev D.S. Investigation of the characteristics of sheets of polyurethane foam by acoustic methods // Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. 2020. V. 23. No. 2. P. 61—68.
12. Fedotovskii V.C. A Porous Medium As an Acoustic Metamaterial with Negative Inertial and Elastic Properties // Acoustical Physics. 2018. V. 64. No. 5. P. 548—554. DOI: 10.1134/S1063771018050020. EDN WTURTZ.
13. Horoshenkov K., Hurrell A., Groby J.-P. Erratum: A three-parameter analytical model for the acoustical properties of porous media // J. Acoust. Soc. Am. 2019. V. 145 (4). P. 2512—2517. DOI: 10.1121/10.0000560
14. Zhang W., Mehrabian A. Связь поромеханики и адсорбции в мультипористых твердых телах // Физ. мезомех. 2023. Т. 26. № 2. С. 43—56. DOI: 10.55652/1683-805X\_2023\_26\_2\_43. EDN LYEEKU.
15. Fomenko S.I., Dzhana R.B., Romashin A.K. Modelirovanie rasprostraneniya uprugikh voln v dvukhfaznoi poristo-uprugoi srede i opredelenie effektivnykh modulei s pomoshch'yu poverkhnostnykh voln / Matematicheskoe modelirovanie v estestvennykh naukakh. Materialy XXXI Vserossiiskoi shkoly-konferentsii. Perm', 05–08 oktyabrya 2022. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2022. V. 1. P. 308—310. EDN LYMNAZ.
16. Kidner M., Hansen C. A comparison and review of theories of the acoustics of porous materials // International Journal of Acoustics and Vibrations. 2008. V. 13. P. 1—27.
17. Lenkov S.V. Acoustic surface waves in porous-elastic biphasic media // Chemical physics and mesoscopy. 2023. V. 25. No. 3. P. 375—384. DOI: 10.15350/17270529.2023.3.33. EDN PBCENE.
18. Il'yasov K.K., Kuznetsov S.V., Sekerzh-Zen'kovich S.Y., Kravtsov A.V. Features of acoustic waves in media with large porosity values in the framework of the Biot theory // Acoustical Physics. 2017. V. 63. No. 6. P. 711—715. DOI: 10.1134/S1063771017060045. EDN XNNLKD.
19. Zhang L., Ba J., Carcione J.M. Wave propagation in infinitupleporosity media // J. Geophy Res: Solid Earth. 2021. V. 126. № 4. DOI: 10.1029/2020JB021266
20. Sitdikova L.F., Gimaltdinov I.K. The problem of the propagation of acoustic waves in a porous environment saturated with bubble liquid // Bulletin of the south ural state university. Series: mathematics. Mechanics. Physics. 2021. V. 13. No. 1. P. 59—66. DOI: 10.14529/mmp210107. EDN QVHMWD.
21. Li J.X., Rezaee R., Muller T.M. Wettability effect on wave propagation in saturated porous medium // J. Acoust. Soc. Am. 2020. V. 147. P. 911—920. DOI: 10.1121/10.0000616

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