

Теплозвуковая аналогия для исследования теплозвукофизических свойств твердых материалов

Владимир Михайлович Фокин, Андрей Васильевич Ковылин

Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ); г. Волгоград, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается метод теплозвуковой аналогии, с помощью которого определяются теплозвукофизические свойства твердых строительных материалов. Приведено математическое исследование, которое позволило выявить параметры, зависимости и критерии, характерные для процесса распространения температурных и звуковых волн в твердых материалах, и вывести новый физический смысл температуропроводности. Математический эксперимент подтвержден проведенным экспериментальным исследованием на образце из фторопласта.

Материалы и методы. Разработанная авторами методика определения комплекса теплозвукофизических свойств твердых материалов базируется на теплозвуковой аналогии. Температурные и звуковые колебания (волны) распространяются в твердом теле по закону косинуса и легко создаются в лабораторных условиях, что дает возможность провести экспериментальное исследование, основанное на измерении температуры и плотности теплового потока на поверхности образца.

Результаты. На основании проведенного эксперимента на исследуемом образце получены экспериментальные данные по температурам и тепловому потоку, что позволило, используя разработанную авторами методику, рассчитать теплозвукофизические свойства материала: теплопроводность, объемную теплоемкость, температуропроводность, поверхностную скорость температурной волны, а также акустическую скорость звука в материале. Математический эксперимент по теплозвуковой аналогии дал возможность установить закон температурной волны. Выведенное правило температурной волны позволило сформулировать новый физический смысл температуропроводности вещества.

Выводы. Полученные экспериментальным путем теплозвукофизические свойства материала согласуются с данными, приведенными в справочной и технической литературе, расхождение не превышает 5 %, что подтверждает проведенный математический эксперимент. Теплозвуковая аналогия позволяет определять не только температуропроводность, но и скорость звука в материалах по температурным и тепловым измерениям на поверхности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теплозвуковая аналогия, теплозвукофизические свойства, теплопроводность, температуропроводность, акустическая скорость звука, звуковые волны, температурные волны, строительные материалы

Благодарности. Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Фокин В.М., Ковылин А.В. Теплозвуковая аналогия для исследования теплозвукофизических свойств твердых материалов // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 7. С. 1151–1160. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1151-1160

Автор, ответственный за переписку: Андрей Васильевич Ковылин, kovylin.andrei@mail.ru.

Thermal and acoustic analogy for the study of thermal acoustic physical properties of solid materials

Vladimir M. Fokin, Andrey V. Kovylin

Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article addresses the method of thermal and acoustic analogy, used to determine thermal and acoustic properties of solid building materials. A mathematical study is provided, which enables identifying parameters, dependencies and criteria characteristic of the propagation of temperature and sound waves in solid materials and to derive a new physical meaning of thermal conductivity. The mathematical experiment is confirmed by the experimental study conducted using a fluoroplastic specimen.

Materials and methods. The method developed by the authors for determining a set of thermal and acoustic properties of solid materials is based on thermal and acoustic analogy. Temperature and sound vibrations (waves) propagate in a solid body according to the cosine law and are easily reproduced in laboratory conditions, which made it possible to conduct an experimental study by measuring the temperature and density of a heat flux on the surface of a specimen.

Results. Experimental data on temperature and heat flow were obtained from the experiment conducted using the specimen under study, which made it possible, using the methodology developed by the authors, to identify thermal and acoustic properties of the material, including thermal conductivity, volumetric heat capacity, thermometric conductivity, surface velocity of temperature waves, as well as the acoustic velocity of sound in the material. In addition, the mathematical experiment

on thermal and acoustic analogy allowed the authors to establish the law of a temperature wave. Moreover, this law enabled formulating a new physical meaning of thermal conductivity of a substance.

Conclusions. Experimentally identified thermal and acoustic properties of the material are consistent with the data provided in the reference and engineering literature, the discrepancy does not exceed 5 %, which confirms the validity of the mathematical experiment. Thermal and acoustic analogy makes it possible to determine not only the thermal conductivity, but also the speed of sound in materials by temperature and heat measurements taken on the surface.

KEYWORDS: thermal and acoustic analogy, thermal and acoustic physical properties, heat conductivity, thermometric conductivity, acoustic speed of sound, sonic waves, temperature waves, building materials

Acknowledgment. The authors would like to thank the anonymous reviewers.

FOR CITATION: Fokin V.M., Kovylin A.V. Thermal and acoustic analogy for the study of thermal acoustic physical properties of solid materials. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(7):1151-1160. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1151-1160 (rus.).

Corresponding author: Andrey V. Kovylin, kovylin.andrei@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Комфортные условия для человека в жилых и общественных зданиях и помещениях достигаются путем обеспечения температурно-влажностного режима, а также шумоизоляцией. Для этого используют различные строительные, тепло- и звукоизолирующие материалы. Оценка эффективности ограждений зданий и помещений зависит от знания теплофизических и звукофизических свойств материалов. Для исследования теплослукофизических свойств твердых строительных материалов авторами разработан новый метод, его отличием от существующих является то, что он позволяет определять не только теплофизические, но и звукофизические свойства твердых материалов за одно экспериментальное исследование методом теплослуковой аналогии. Разработанная методика определения комплекса теплослукофизических свойств твердых материалов с помощью неразрушающего метода испытаний основана на измерении температуры и плотности теплового потока на поверхности образца.

Разработка нового метода выявления теплослукофизических свойств твердых материалов базируется на принципах теплослуковой аналогии, а также физико-математической модели температурных полей. Авторами статьи разработан новый метод определения теплослукофизических свойств твердых материалов, на который получены патенты на изобретения, в его основе — измерение температур и плотности теплового потока на поверхности образца методом неразрушающих испытаний [1].

Для экспериментального исследования выбран образец твердого материала — фторопласт, с известными теплослукофизическими свойствами, приведенными в справочной и технической литературе [2, 3]. Исследование различных материалов неразрушающим методом испытаний, а также изучение разных методов определения теплофизических свойств материалов рассматривалось отечественными и зарубежными авторами [4–19]. Теоретические основы по определению звукофизических свойств приведены в работе [20].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Температурные и звуковые колебания (волны) распространяются в твердом теле по закону косинуса и легко создаются в лабораторных условиях. Для проведения математического эксперимента рассмотрим однородную, изотропную плоскую пластину, для которой физические свойства постоянны и не зависят от температуры и влажности, деформации внутри объема (в связи с температурными напряжениями) незначительны по сравнению с объемом, а макрочастицы внутри объема неподвижны относительно друг друга.

Если пластина определенных размеров, толщиной δ , с начальной температурой T_0 подвергается интенсивному нагреву любым тепловым потоком со стороны одной наружной поверхности ($x = 0$) до температуры T_c и поддерживается неизменной на протяжении всего времени релаксации, то процесс переноса теплоты в пластине имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

с условиями однозначности (начальные и граничные):

$$T_{\tau=0} = T_0; \quad T_{x=0} = T_c.$$

Для решения уравнения (1) воспользуемся избыточными температурами:

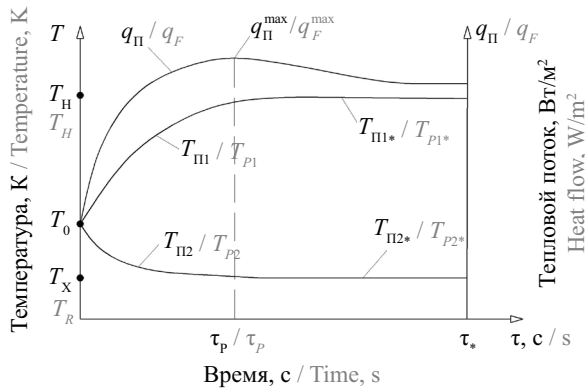
$$\vartheta = (T_c - T) \text{ и } \vartheta_0 = (T_c - T_0).$$

Тогда уравнение (1) для пластины примет вид:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}.$$

Распределение температур и теплового потока в пластине по времени нагрева приведено на рисунке [20].

В результате интенсивного теплового воздействия на наружную поверхность в пластине по толщине образовывается тепловая волна, и, как любая волна (воды, воздуха в природе), она перемещается от поверхности нагрева по всему объему вещества, но само вещество остается на месте. Кроме того, тепловая или температурная волна в зависимости



Распределение температур и теплового потока в пластине: T_0 — начальная температура пластины; T_H — температура нагревателя; T_X — температура холодильника; T_{P1} — температура пластины со стороны нагревателя; T_{P2} — температура пластины со стороны холодильника; T_{P1*} — температура поверхности пластины со стороны нагревателя в стационарном режиме; T_{P2*} — температура поверхности пластины со стороны холодильника в стационарном режиме; q_{P1} — тепловой поток на поверхности пластины со стороны нагревателя; q_{P1}^{max} — максимальный тепловой поток на поверхности пластины; τ_p — время наступления упорядоченного теплового режима или достижения максимального теплового потока; τ_* — время наступления стационарного теплового режима в пластине

Distribution of temperatures and heat flow in the plate: T_0 is the initial temperature of the plate; T_H is the temperature of the heater; T_X is the temperature of the refrigerator; T_{P1} is the plate temperature on the heater side; T_{P2} is the plate temperature on the refrigerator side; T_{P1*} is the plate surface temperature on the heater side in the steady mode; T_{P2*} is the temperature of the plate surface in the steady mode on the refrigerator side; q_{P1} is the heat flow on the surface of the plate on the heater side; q_{P1}^{max} is the maximum heat flow on the plate surface; τ_p is the time of the onset of the normalized thermal mode or the achievement of maximum heat flow; τ_* is the time of the onset of the steady thermal mode in the plate

от толщины пластины δ и времени τ станет затухающей с определенной долей проникновения (или поглощения). Распределение температур в пластине по толщине осуществляется в зависимости от способа нагрева или охлаждения, а именно от начального режима и до упорядоченного или стационарного теплового режима.

По истечении некоторого отрезка времени τ_p от начала процесса нагрева, который называется начальным периодом (описывается сложными математическими уравнениями), внешнее тепловое воздействие затронет в какой-то мере центральные участки объема пластины и наступит упорядоченный тепловой режим. Интенсивность теплоты или плотность теплового потока на поверхности пластины со стороны нагрева в этот момент времени (τ_p) достигнет максимума q_{P1}^{max} , а затем на всем

протяжении дальнейшего процесса нагрева останется либо постоянной, либо с определенным темпом, незначительно изменяясь, снижается, в зависимости от граничных условий охлаждения пластины на поверхности со стороны охлаждения T_{P2} .

Температура на поверхности пластины T_{P1} со стороны нагрева в течение времени изменяется по экспоненциальному закону от начальной температуры T_0 , проходит стадию упорядоченного теплового режима и выходит на стационарный тепловой режим T_{P1*} .

Температура на поверхности пластины T_{P2} со стороны охлаждения изменяется от начальной температуры T_0 , а затем в течение времени выходит на стационарный тепловой режим T_{P2*} .

Начальный период нагрева (охлаждения) заканчивается, когда плотность теплового потока на поверхности пластины со стороны нагрева станет максимальной и наступит упорядоченный тепловой режим, который в течение времени переходит либо в стационарный тепловой режим, либо в термодинамическое равновесие, в зависимости от граничных условий и экспериментальной установки или метода его осуществления. В начальный период нагрева (до τ_p) часть тепловой энергии затрачивается на аккумуляцию тела.

При несимметричном нагреве пластины по истечении времени упорядоченный тепловой режим вписывается в стационарную стадию. Время от наступления упорядоченного теплового режима (τ_p) до времени наступления стационарного теплового режима (τ_*) определяет только половину времени полного периода гармонического колебания температурной волны, а вторая половина времени условно отводится на охлаждение пластины. Поэтому обосновано считать, что частота колебаний температурной полу волны ν зависит от промежутка времени τ_* и составит $\nu = 1/\tau_*$, а частота гармонических колебаний полной температурной волны составит $\nu = 1/2\tau_*$.

В процессе распространения теплоты образует волна, которая выравнивает температуры на поверхности пластины и в теле по определенным законам. В стационарном тепловом режиме распределение температур в теле по толщине осуществляется по закону Фурье: $q = -\lambda(\partial\theta_{x,\tau}/\partial x)$.

В стадии наступления стационарного теплового режима в пластине (время τ_*) число Фурье вычисляется по формуле $Fo = (a \cdot \tau_*)/\delta^2$, разность температур вычисляется по выражению: $\Delta T_* = T_H - T_X$ или $\Delta T_* = T_{P1*} - T_{P2*}$, а тепловой поток в пластине имеет вид:

$$q_{П1}^* = \lambda(\Delta T_*/\delta) = (\lambda/\delta) \cdot (T_H - T_X) = (\lambda/\delta) \cdot (T_{P1*} - T_{P2*}).$$

Если в период наступления стационарной стадии нагрева τ_* известна плотность теплового потока $q_{П1}^*$ на поверхности, толщина пластины δ и перепад

температур по толщине ΔT_* , то коэффициент теплопроводности равен:

$$\lambda = ((q_{\text{пл}}^* \cdot \delta) / \Delta T_* = (q_{\text{пл}}^* \cdot \delta) / (T_{\text{н}} - T_{\text{х}})) = (q_{\text{пл}}^* \cdot \delta) / (T_{\text{пл}*} - T_{\text{пл}2*}).$$

Известно, что коэффициент теплопроводности, температуропроводность, объемная теплоемкость, весовая (массовая) теплоемкость и плотность материала связаны соотношениями:

$$\begin{aligned} a &= \lambda / (c\rho), \text{ м}^2/\text{с}; \\ \lambda &= a \cdot (c\rho), \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \\ (c\rho) &= \lambda / a, \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}); \\ c &= (c\rho) / \rho, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

Следует отметить, что дифференциальное уравнение теплопроводности (1) и волновое уравнение для плоской акустической волны, как и частное решение волнового уравнения, имеют один вид.

В пластине (см. рис.) максимальная амплитуда колебаний температурной волны на поверхности со стороны нагрева определяется в упорядоченном или в стационарном тепловом режиме по формуле:

$$\vartheta_{\text{пл}}^{\text{max}} = 0,5(T_{\text{пл}} - T_0) = 0,5(T_{\text{пл}*} - T_0).$$

Угловая (круговая) частота колебаний температурной волны ω_{T} и акустической волны $\omega_{\text{А}}$ в пластине равна:

$$\omega_{\text{T}} = 2\pi/z, 1/\text{с}; \omega_{\text{А}} = 2\pi f, 1/\text{с},$$

где z — полный период колебания температурной волны, с; f — частота звуковых колебаний, с⁻¹.

Также очевидно, что в пластине (см. рис.) время подъема температурной полуволны τ_* в процессе нагрева до упорядоченного или стационарного теплового режима и время предполагаемого спада температурной полуволны в процессе охлаждения будут показывать только половину от времени полного периода колебаний температурной волны, а именно: $z = 2\tau_*$.

Тогда угловая (круговая) частота колебаний температурной волны в пластине при упорядоченном и стационарном тепловом режиме будет иметь вид:

$$\omega_{\text{T}}^{\text{пл}} = 2\pi/z = 2\pi/2\tau_* = \pi/\tau_*, 1/\text{с}, \quad (2)$$

где τ_* — время цикла за сутки (86 400 с).

Волновое число k для температурной волны k_{T} и звуковой (акустической) волны $k_{\text{А}}$ соответственно равны:

$$k_{\text{T}} = \sqrt{\omega_{\text{T}}/2a}, \text{ м}^{-1}; \quad (3)$$

$$k_{\text{А}} = \omega_{\text{А}}/C_{\text{А}}, \text{ м}^{-1},$$

где a — температуропроводность материала, м²/с; $C_{\text{А}}$ — скорость звука в материале, м/с.

Тогда волновое число для пластины в упорядоченном тепловом режиме и в момент наступления

стационарного теплового режима τ_* , согласно выражениям (2) и (3), равно:

$$k_{\text{T}}^{\text{пл}} = \sqrt{\pi/(2a \cdot \tau_*)}, \text{ м}^{-1}. \quad (4)$$

Следовательно, если будет известно волновое число в пластине $k_{\text{T}}^{\text{пл}}$, то полученное уравнение (4) позволяет определить температуропроводность пластины в момент наступления стационарного теплового режима τ_* , либо время наступления стационарного теплового режима в пластине, а именно:

$$a = \pi/[2\tau_*(k_{\text{T}}^{\text{пл}})^2], \text{ м}^2/\text{с}.$$

Косинусоида температурной волны в пластине в стадии упорядоченного или стационарного теплового режима (при $\tau = \tau_*$) стремится к единице:

$$\cos(\omega\tau - kx) = 1,$$

а уравнение для температурной волны имеет вид:

$$\vartheta_{x,\tau} = \vartheta_{\text{пл}}^{\text{max}} \cdot e^{-k_{\text{T}}x}. \quad (5)$$

Для звуковой волны звуковое давление в материале $P_{x,\tau}$ также зависит от звукового давления на поверхности P_m^{max} и имеет вид:

$$P_{x,\tau} = P_m^{\text{max}} \cdot e^{-k_{\text{А}}x}. \quad (6)$$

Звуковое давление P — это сила в ньютонах (Н), действующая на единицу поверхности (м²) и имеющая размерность — Н/м². Эта единица называется Паскаль (Па), а звуковое давление $P = 1 \text{ Н}/\text{м}^2 = 1 \text{ Па} = 1 \text{ кгс}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$. Звуковое давление в паскалях в 1000 раз меньше атмосферного давления и не превышает 20–100 Па.

Полученные уравнения температурной волны (5) и звуковой волны (6) позволяют определить глубину и долю проникновения температурных и звуковых волн в твердых материалах.

Отметим, что еще в 1729 г. Пьер Бугер в законе затухания плоских волн (закон П. Бугера) установил, что линейный коэффициент половинного поглощения волн $kx = 0,69$, что подтверждает проведенный математический и физический эксперимент. Так же проведенный математический эксперимент по установлению доли проникновения температурных и звуковых волн определяет методику расчета волнового числа в пластине при любой доле проникновения гармонических колебаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальное исследование теплофизических, звукофизических свойств проводилось на твердом материале из фторопласта. Авторами выполнено множество серий экспериментальных исследований. Приведем полученные экспериментальные данные и методику с расчетом теплофизических и звукофизических свойств исследуемого материала.

Начальная температура образца $T_0 = 23,0^\circ\text{C}$; толщина образца $\delta = 0,020 \text{ м}$; температура поверхности образца со стороны нагревателя $T_{\text{пл}} = 35,0^\circ\text{C}$;

температура поверхности образца со стороны холодильника $T_{п2} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; плотность теплового потока при доле проникновения температурной волны, равной значению 0,25 $q_{п} = 150\text{ Вт/м}^2$; время наступления стационарного теплового режима $\tau_p = 2520\text{ с}$.

Амплитуда колебаний температурной полуволны вычисляется по формуле и численно равна:

$$\vartheta_{п} = 0,5(T_{п1} - T_{п2}) = 0,5(35 - 20) = 7,5, \text{ }^{\circ}\text{C},$$

где $T_{п1}$ — температура поверхности образца со стороны нагревателя в момент времени наступления стационарного теплового режима, $^{\circ}\text{C}$; $T_{п2}$ — температура поверхности образца со стороны холодильника в момент времени наступления стационарного теплового режима, $^{\circ}\text{C}$.

Коэффициент теплоусвоения вычисляется по формуле и численно равен:

$$B = q_{п} / \vartheta_{п} = 150 / 7,5 = 20,0\text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где $q_{п}$ — плотность теплового потока со стороны нагревателя в момент времени наступления стационарного теплового режима, Вт/м^2 ; $\vartheta_{п}$ — амплитуда колебаний температурной полуволны, $^{\circ}\text{C}$.

Термическое сопротивление вычисляется по формуле и численно равно:

$$R = \frac{T_{п1} - T_{п2}}{q_{п}} = \frac{35 - 20}{150} = 0,10 (\text{м}^2 \cdot \text{К}) / \text{Вт},$$

где $T_{п1}$ — температура поверхности образца со стороны нагревателя в момент времени наступления стационарного теплового режима, $^{\circ}\text{C}$; $T_{п2}$ — температура поверхности образца со стороны холодильника в момент времени наступления стационарного теплового режима, $^{\circ}\text{C}$.

Доля проникновения температурной волны рассчитывается по формуле и численно равна:

$$\theta_T = \frac{T_0 - T_{п2}}{T_{п1} - T_0} = \frac{23 - 20}{35 - 23} = 0,25,$$

где T_0 — начальная температура поверхности образца, $^{\circ}\text{C}$; $T_{п1}$ — температура поверхности образца со стороны нагревателя в момент времени наступления стационарного теплового режима, $^{\circ}\text{C}$; $T_{п2}$ — температура поверхности образца со стороны холодильника в момент времени наступления стационарного теплового режима, $^{\circ}\text{C}$.

Волновое температурное число определяется в момент времени наступления стационарного теплового режима и вычисляется по формуле и численно равно:

$$k_T^{\text{пл}} = H / \delta = 1,414 / 0,02 = 70,7, \text{ м}^{-1},$$

где H — безразмерное волновое число, определяемое расчетным путем при доле проникновения температурной волны 0,243–0,25, равное соответственно 1,39–1,414; δ — толщина образца, м.

Коэффициент теплопроводности вычисляется по формуле и численно равен:

$$\lambda = B / (H \cdot k_T^{\text{пл}}) = 20 / (1,414 \cdot 70,7) = 0,20, \text{ Вт/}(\text{м} \cdot \text{К}),$$

где B — коэффициент теплоусвоения, $\text{Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; H — безразмерное волновое число, определяемое расчетным путем в момент наступления стационарного теплового режима; $k_T^{\text{пл}}$ — волновое температурное число образца, вычисленное в момент времени наступления стационарного теплового режима.

Объемная теплоемкость вычисляется по формуле и численно равна:

$$(c\rho) = B^2 \cdot \tau / (\pi \cdot \lambda) = (20^2 \cdot 2520) / (3,14 \cdot 0,2) = 1610 \cdot 10^3, \text{ Дж/}(\text{м}^3 \cdot \text{К}),$$

где B — коэффициент теплоусвоения, $\text{Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; τ — время наступления стационарного теплового режима, определяемое по графику, с; π — математическая константа; λ — коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/}(\text{м} \cdot \text{К})$.

Тепловая инерция вычисляется по формуле и численно равна:

$$b = \lambda \cdot (c\rho) = 0,2 \cdot (1610 \cdot 10^3) = 0,322 \cdot 10^6, \text{ Дж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2),$$

где λ — коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/}(\text{м} \cdot \text{К})$; $(c\rho)$ — объемная теплоемкость, $\text{Дж/}(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Тепловая активность вычисляется по формуле и численно равна:

$$b_* = \sqrt{b} = \sqrt{0,322 \cdot 10^6} = 0,567 \cdot 10^3, \text{ Дж/}(\text{с}^{0,5} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где b — тепловая инерция, $\text{Дж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2)$.

Далее рассчитываем теплофизический параметр: термопроводность — это безразмерный коэффициент, который характеризует долю отношения прошедшей через образец энергии температурной волны (Дж) к энергии, подведенной к образцу, определяемый по формуле.

Термопроводность вычисляется по формуле и численно равна:

$$\alpha_{\text{ТЕРМ}} = 10^{-0,434 \cdot k_T^{\text{пл}} \cdot \delta} = 10^{-0,434 \cdot 70,7 \cdot 0,02} = 0,243,$$

где 0,434 — математическая константа; $k_T^{\text{пл}}$ — волновое температурное число образца в виде пластины, вычисленное в момент времени наступления стационарного теплового режима, м^{-1} ; δ — толщина образца, м.

Термоизоляция вычисляется по формуле и численно равна:

$$R_{\text{ТЕРМ}} = 4,34 (k_T^{\text{пл}} \cdot \delta) = 4,34 (70,7 \cdot 0,02) = 6,14, \text{ дБ}, \quad (7)$$

где 4,34 — математическая константа; $k_T^{\text{пл}}$ — волновое температурное число образца в виде пластины, вычисленное в момент времени наступления стационарного теплового режима, м^{-1} ; δ — толщина образца, м.

Из соотношения (7) можно определить, что термоизоляция более эффективна при большей толщине пластины, меньшем коэффициенте теплопроводности вещества, меньшем времени установления в пластине стационарного теплового режима.

Теплопроводность вычисляется по формуле и численно равна:

$$a = \pi / [2\tau(k_T^{\text{пл}})^2] = 3,14/2 \cdot 2520 \cdot (70,7)^2 = 0,125 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с},$$

где π — математическая константа; τ — время наступления стационарного теплового режима, определяемое по графику, с; $k_T^{\text{пл}}$ — волновое температурное число, вычисленное в момент времени наступления стационарного теплового режима, м^{-1} .

Далее определим поверхностную скорость плоской температурной волны $S_{\text{п}}$. Она измеряется в м/с и характеризует распределение температурной волны от наружной поверхности пластины со стороны нагревателя до холодильника при поверхностной плотности условной пластины $\rho_{\text{п}}$ ($\text{кг}/\text{м}^2$), т.е. при соответствующей толщине пластины δ , м. Прилагаемое «плоская» температурная волна означает рассмотрение температурных и тепловых процессов в плоской системе координат (в пластине) ввиду наличия цилиндрических и шаровых волн.

Следовательно: *поверхностная скорость плоской температурной волны в пластине $S_{\text{п}}$* численно равна отношению пути δ , пройденного температурной волной, за время τ_* (с), до момента наступления стационарного теплового режима. Поверхностная скорость плоской температурной волны численно пропорциональна теплопроводности a материала и равна: $S_{\text{п}} = a/\delta$.

Установлено, что аналогично ведет себя и поверхностная плотность $\rho_{\text{п}}$, которая определяется по формуле: $\rho_{\text{п}} = \rho \cdot \delta$, которая при толщине пластины $\delta = 1$ м численно равна удельной плотности ρ . Так как поверхностная плотность $\rho_{\text{п}}$ пропорциональна толщине пластины δ , то устанавливается соотношение или правило для температурной волны.

Математический эксперимент по тепловзвучивой аналогии позволяет установить *закон температурной волны*: квадрат поверхностной скорости плоской температурной волны $S_{\text{п}}$, м/с, проходящей через пластину прямо, пропорционален термическому напряжению на поверхности $\psi_{\text{п}}$, Па·м, и обратно пропорционален поверхностной плотности изделия $\rho_{\text{п}}$, $\text{кг}/\text{м}^2$:

$$S_{\text{п}}^2 = \Phi_{\text{К}} (\psi_{\text{п}}/\rho_{\text{п}}).$$

Правило температурной волны: поверхностная скорость плоской температурной волны $S_{\text{п}}$, проходящей через плоское твердое тело, уменьшается пропорционально увеличению поверхностной плотности вещества, а при численном равенстве удельной и поверхностной плотности (т.е. при толщине пластины $\delta = 1$ м) поверхностная скорость пло-

ской температурной волны $S_{\text{п}}^*$, м/с, соответственно при $\delta = 1$ м численно пропорциональна теплопроводности вещества a ($\text{м}^2/\text{с}$), т.е. устанавливается соотношение:

$$S_{\text{п}}^* = a \text{ при } \delta = 1 \text{ м.}$$

Из формулировки правила температурной волны вытекает новый *физический смысл теплопроводности* вещества (материала): теплопроводность a , $\text{м}^2/\text{с}$, характеризует поверхностную скорость плоской температурной волны $S_{\text{п}}^*$, м/с, на глубине (толщине пластины, изделия) $\delta = 1$ м в момент наступления стационарного теплового режима τ_* .

Поверхностная скорость температурной волны вычисляется по формуле и численно равна:

$$S_{\text{п}} = a/\delta = 0,125 \cdot 10^{-6}/0,02 = 6,25 \cdot 10^{-6}, \text{ м/с},$$

где a — теплопроводность, $\text{м}^2/\text{с}$; δ — толщина образца, м.

Далее рассчитываем термическое напряжение $\psi_{\text{п}}^{\text{пл}}$, которое возникает в любой точке среды объема материала пластины за счет нагрева или воздействия теплового потока любой интенсивности при прохождении температурной волны и представляет собой тепловое давление, действующее на единицу глубины по толщине пластины. Термическое напряжение обратно пропорционально половине термического сопротивления теплопроводности пластины.

Термическое напряжение на поверхности образца вычисляется по формуле и численно равно:

$$\psi_{\text{п}}^{\text{пл}} = 2/R = 2/0,1 = 20,0, \text{ Па} \cdot \text{м},$$

где R — термическое сопротивление, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

Получившаяся размерность термического напряжения в Па·м объясняется следующим. Для условий стационарного теплового режима при прохождении теплоты $Q = 1$ Дж в единицу времени $\tau = 1$ с через объем вещества $V = 1 \text{ м}^3$ возникает температурная волна с амплитудой $\theta = 1$ °С, что подтверждается термодинамическим законом (Менделеева — Клапейрона) и законом сохранения энергии, а именно в данном случае переходе части тепловой энергии Q в механическую энергию в виде теплового давления, т.е. по существу и по размерности выполняется условие:

$$1 \text{ Дж}/(\text{с} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{К}) = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}) = 1 \text{ Па или Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) = (\text{Па} \cdot \text{м}).$$

Безразмерное число волновой скорости рассчитывают по формуле:

$$\Phi_{\text{К}} = S_{\text{п}}^2 (\rho_{\text{п}}/\psi_{\text{п}}^{\text{пл}}) = (6,25 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (44/20) = 0,0859 \cdot 10^{-9},$$

где $S_{\text{п}}$ — поверхностная скорость температурной волны, м/с; $\rho_{\text{п}}$ — поверхностная плотность, $\text{кг}/\text{м}^2$; $\psi_{\text{п}}^{\text{пл}}$ — термическое напряжение на поверхности, Па·м.

Теплозвукофизические свойства фторопласта
Thermal and acoustic physical properties of fluoroplast

Параметр Characteristic	Экспериментальные значения Experimental values	Справочные значения Reference values
Теплопроводность λ , Вт/(м·К) Heat conductivity λ , W/(m·K)	0,20	0,19–0,22
Объемная теплоемкость c_p , кДж/(м³·К) Volumetric heat capacity c_p , KJ/(m³·K)	1610	1500–1700
Температуропроводность $a \cdot 10^6$, м²/с Thermal conductivity $a \cdot 10^6$, m²/s	0,125	0,1–0,135
Звуковая (акустическая) скорость, м/с Sound (acoustic) speed, m/s	1455	1400–1500

Скорость распространения звука в твердом материале вычисляется по формуле и численно равна:

$$C_A = S_{\Pi}^* / \Phi_K = 0,125 \cdot 10^{-6} / 0,0859 \cdot 10^{-9} = 1455 \text{ м/с,}$$

где S_{Π}^* — поверхностная скорость температурной волны на глубине 1 м численно пропорциональна температуропроводности (a) материала, м/с; Φ_K — безразмерное число волновой скорости.

Для наглядности в таблице приведено сравнение некоторых экспериментальных и справочных данных фторопласта.

Анализируя приведенные в таблице экспериментальные и справочные значения теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности, акустической скорости для фторопласта, можно сказать, что расхождение между ними составляет не более 5 %, что говорит о надежности разработанного нового метода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанный новый метод определения теплофизических и звукофизических свойств твердых материалов позволяет установить теплозвукофизические свойства твердого строительного материала за одно экспериментальное исследование. Теплозвуковая аналогия и проведенный математический эксперимент дали возможность определить коэффициент теплопроводности. Выявлено, что коэффициент теплопроводности α_{TERM} становится меньше и, следова-

тельно, более эффективней с увеличением толщины δ , уменьшением температуропроводности вещества a , уменьшением времени установления стационарного теплового режима τ_* . С уменьшением коэффициента теплопроводности α_{TERM} термоизоляция R_{TERM} увеличивается и будет считаться более энергоэффективной (например, в процессе производства термоизоляции) или менее энергоэффективной (в процессе эксплуатации).

Также теплозвуковая аналогия и математический эксперимент позволили определить термоизоляцию R_{TERM} , которая более эффективна при большей толщине пластины δ , меньшем коэффициенте температуропроводности вещества a , меньшем времени установления в пластине стационарного теплового режима.

Разработанная авторами методика определения волнового числа позволяет определять его при любой доле проникновения гармонических колебаний, что имеет огромное практическое значение для экспериментальных исследований. Кроме того, проведенный математический эксперимент по установлению доли проникновения температурных и звуковых волн определяет методику расчета волнового числа в пластине при любой доле проникновения гармонических колебаний.

Из правила температурной волны впервые сформулирован новый физический смысл коэффициента температуропроводности материала.

Полученные экспериментальные данные теплозвукофизических свойств фторопласта сравнивались со справочными значениями, расхождение составляет не более 5 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Патент RU № 2767468 C1, МПК G01N 25/18, G01N 3/54. Способ определения комплекса теплозвукофизических и механических характеристик твердых материалов / Фокин В.М., Ковылин А.В.; патентообл. Ковылин А.В.; заявл. № 2023104914 от 01.03.2023; опубл. 01.08.2023. Бюл. № 22.

2. Дмитривич А.Д. Определение теплофизических свойств строительных материалов. М. : Госстройиздат, 1963.

3. Иофе В.К., Корольков В.Г., Сапожков М.А. Справочник по акустике. М. : Связь, 1979. 312 с.

4. Vladimirovich K.O., Aleksandrovich P.S., Alexandrovich P.A., Sergeevna S.E. Automated portable installation to determine the thermo physical properties of the object // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. 2019. Vol. 16. Issue 7. Pp. 3115–2120. DOI: 10.1166/jctn.2019.8228

5. Vladimirovich K.O., Aleksandrovich P.S., Alexan-

drovich P.A., Sergeevna S.E. Measuring the thermo physical properties of construction projects // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. 2019. Vol. 16. Issue 7. Pp. 3121–3127. DOI: 10.1166/jctn.2019.8229

6. Shaimerdenova K.M. Investigation of the thermophysical characteristics of minerals at various heating parameters // Eurasian Physical Technical Journal. 2021. Vol. 18. Issue 1. Pp. 70–74. DOI: 10.31489/2021no1/70-74

7. Mikailsoy F.D. On the influence of boundary conditions in modeling heat transfer in soil // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2017. Vol. 90. Issue 7. Pp. 67–79. DOI: 10.1007/s10891-017-1540-y

8. Yakushkin I.P. Development of a module to measure losses through building envelopes for the smart energy-saving ventilation automatic control system // International Journal of Control Theory and Applications. 2016. Vol. 9. Issue 30. Pp. 1–7.

9. Kuznetsov G.V., Katz M.D. Analysis of conditions for determining the thermophysical characteristics of energetic materials by the laser pulse method // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2016. Vol. 10. Issue 6. Pp. 978–982. DOI: 10.1134/s1990793116060051

10. Yur'ev B.P., Gol'tsev V.A. Thermophysical properties of Kachkanar titanomagnetite pellets // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. Issue 5. Pp. 329–333. DOI: 10.3103/s0967091216050168

11. Dzhuraev D.S., Safarov M.M. Studies of thermophysical properties of ferrofluids // Measurement Techniques. 2016. Vol. 59. Issue 7. Pp. 743–746. DOI: 10.1007/s11018-016-1040-z

12. Shchukina T.V., Sheps R.F., Burak E.E. Energy-saving regimes examination during new generation building structures insulation: international multi-conference on industrial engineering and modern technologies electronic edition // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. P. 022072. DOI: 10.1088/1757-899x/463/2/022072

13. Kryuchkov O.B., Malenko P.I., Konovalov S.S., Kostygova O.V. The study of the influence of the initial furnace temperature on the temperature drop across the section of a billet using physical modeling // Черные металлы. 2018. № 12. С. 34–40. EDN OFJHLU.

14. Брайцев Э.В., Сиссе М., Ватин Н.И. Определение звукоизоляции воздушного шума перегородок готовых сантехнических модулей компании «Modulbau» Россия // Неделя науки ИСИ : мат. Всерос. конф. в 3 частях. Ч. 2. 2021. С. 123–126. EDN YYLOKM.

15. Усадский Д.Г. Методы технического контроля эффективных энергетических систем зданий и сооружений // Новая наука: стратегии и векторы развития. 2016. № 4–2 (76). С. 181–184. EDN VTKXAV.

16. Удалова А.П., Чернышов В.Н. Метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов и изделий с использованием СВЧ-нагрева в реальных условиях эксплуатации изделий // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24. № 11 (281). С. 58–63. DOI: 10.14489/td.2021.11.058-063. EDN WQHUYU.

17. Чернышов А.В., Голиков Д.О., Чернышов В.Н. Метод и система оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов // Контроль. Диагностика. 2010. № 11. С. 57–61. EDN NBNGXN.

18. Корниенко С.В., Ватин Н.И., Горшков А.С. Оценка теплозащиты эксплуатируемых жилых зданий из газобетонных блоков // Энергосбережение. 2016. № 7. С. 56–72. EDN WWCNPZ.

19. Беранек Л. Акустические измерения. М. : Изд-во иностр. лит., 1952. 627 с.

20. Фокин В.М., Ковылин А.В., Усадский Д.Г. Метод определения теплофизических свойств твердых материалов с использованием волнового температурного числа // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023. № 2 (770). С. 101–112. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-770-2-101-112. EDN PRGMTS.

Поступила в редакцию 8 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 16 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 21 ноября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владимир Михайлович Фокин** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры энергоснабжения, теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28; РИНЦ ID: 635951; fokinvm@mail.ru;

Андрей Васильевич Ковылин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергоснабжения, теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400005 г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28; РИНЦ ID: 554124, Scopus: 5721414300, ResearcherID: N-7036-2016, ORCID: 0009-0000-3497-3394; kovylin.andrei@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Patent RU No. 2767468 C1, IPK8 G01N 25/18, G01N 3/54. *Method for determining the complex of thermal and sound-physical and mechanical characteristics of solid materials* / Fokin V.M., Kovylin A.V.; proprietor Kovylin A.V.; applic. No. 2023104914 01.03.2023; Publ. 01.08.2023. Bul. No. 22.
2. Dmitrovich A.D. *Determination of thermo-physical properties of building materials*. Moscow, Gosstroyizdat, 1963. (rus.).
3. Iofe V.K., Korol'kov V. G., Sapozhkov M.A. *Handbook of Acoustics*. Moscow, Svyaz' Publ., 1979; 312. (rus.).
4. Vladimirovich K.O., Aleksandrovich P.S., Alexandrovich P.A., Sergeevna S.E. Automated portable installation to determine the thermo physical properties of the object. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. 2019; 16(7):3115-2120. DOI: 10.1166/jctn.2019.8228
5. Vladimirovich K.O., Aleksandrovich P.S., Alexandrovich P.A., Sergeevna S.E. Measuring the thermo physical properties of construction projects. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. 2019; 16(7):3121-3127. DOI: 10.1166/jctn.2019.8229
6. Shaimerdenova K.M. Investigation of the thermophysical characteristics of minerals at various heating parameters. *Eurasian Physical Technical Journal*. 2021; 18(1):70-74. DOI: 10.31489/2021no1/70-74
7. Mikailsoy F.D. On the influence of boundary conditions in modeling heat transfer in soil. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017; 90(7):67-79. DOI: 10.1007/s10891-017-1540-y
8. Yakushkin I.P. Development of a module to measure losses through building envelopes for the smart energy-saving ventilation automatic control system. *International Journal of Control Theory and Applications*. 2016; 9(30):1-7.
9. Kuznetsov G.V., Katz M.D. Analysis of conditions for determining the thermophysical characteristics of energetic materials by the laser pulse method. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2016; 10(6):978-982. DOI: 10.1134/s1990793116060051
10. Yur'ev B.P., Gol'tsev V.A. Thermophysical properties of Kachkanar titanomagnetite pellets. *Steel in Translation*. 2016; 46(5):329-333. DOI: 10.3103/s0967091216050168
11. Dzhuraev D.S., Safarov M.M. Studies of thermophysical properties of ferrofluids. *Measurement Techniques*. 2016; 59(7):743-746. DOI: 10.1007/s11018-016-1040-z
12. Shchukina T.V., Sheps R.F., Burak E.E. Energy-saving regimes examination during new generation building structures insulation: international multi-conference on industrial engineering and modern technologies electronic edition. *IOP Conference Series : materials Science and Engineering*. 2018; 463:022072. DOI: 10.1088/1757-899x/463/2/022072
13. Kryuchkov O.B., Malenko P.I., Konovalov S.S., Kostygova O.V. The study of the influence of the initial furnace temperature on the temperature drop across the section of a billet using physical modeling. *Chernye Metally*. 2018; 12:34-40. EDN OFJHLU.
14. Braitsev E.V., Cisse M., Vatin N.I. Determination of sound insulation of air noise of partitions of ready-made sanitary modules of the company "Modulbau" Russia. *ISI Science Week : materials of the All-Russian conference in 3 parts. Part 2*. 2021; 123-126. EDN YYLOKM. (rus.).
15. Usadsky D.G. Methods of technical control of efficient energy systems of buildings and structures. *New Science: Strategies and Vectors of Development*. 2016; 4-2(76):181-184. EDN VTKXAV. (rus.).
16. Udalova A.P., Chernyshov V.N. Non-destructive testing method of materials and products thermophysical characteristics using microwave heating in products real operating conditions. *Testing. Diagnostics*. 2021; 24(11):58-63. DOI: 10.14489/td.2021.11.pp.058-063. EDN WQHUYU. (rus.).
17. Chernyshov A.V., Golikov D.O., Chernyshov V.N. Method and system of the operative control of building materials thermophysics characteristics. *Testing. Diagnostics*. 2010; 11:57-61. EDN NBNGXN. (rus.).
18. Kornienko S.V., Vatin N.I., Gorshkov A.S. Assessment of thermal protection of operated residential buildings made of aerated concrete blocks. *Energosberazhenie*. 2016; 7:56-72. EDN WWCNPZ. (rus.).
19. Beranek L. *Acoustic measurements*. Moscow, Publishing House of Foreign Literature, 1952; 627. (rus.).
20. Fokin V.M., Kovylin A.V., Usadsky D.G. Method for determining the thermophysical properties of solid materials using the wave temperature number. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2023; 2(770):101-112. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-770-2-101-112. EDN PRGMTS. (rus.).

Received October 8, 2023.

Adopted in revised form on October 16, 2023.

Approved for publication on November 21, 2023.

BIONOTES: Vladimir M. Fokin — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Energy Supply, Heat Engineering, Heat Gas Supply and Ventilation; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005; Russian Federation; ID RSCI: 635951; fokinvm@mail.ru;

Andrey V. Kovylin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Energy Supply, Heat Engineering, Heat Gas Supply and Ventilation; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005; Russian Federation; ID RSCI: 554124, Scopus: 5721414300, ResearcherID: N-7036-2016, ORCID: 0009-0000-3497-3394; kovylin.andrei@mail.ru.

Contribution of the authors: authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.