

УДК 536.24

А. В. Ковылин, В. М. Фокин, Д. Г. Усадский, Н. И. Стефаненко

Волгоградский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЗВУКОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТЕКЛОПАКЕТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОЗВУКОВОЙ АНАЛОГИИ

Статья посвящена комплексному анализу теплофизических и звукофизических характеристик современных стеклопакетов, выступающих в роли ограждающих конструкций зданий. Фундаментальную основу исследования составляет теория теплосвуковой аналогии, применение которой позволило математически описать единые закономерности волнового переноса энергии в твердых телах. Авторами разработана строгая аналитическая модель, выявляющая ключевые зависимости и критерии распространения температурных и акустических возмущений. Достоверность теоретических выводов подтверждена в ходе натурных экспериментов. Подробно изложена методология испытаний и представлен расчетный аппарат, позволивший определить эквивалентную теплопроводность, объемную теплоемкость, температуропроводность, поверхностную скорость температурной волны, а также скоростные показатели звуковых волн в исследуемом образце.

Ключевые слова: теплосвуковая аналогия, теплосвукофизические свойства, эквивалентная теплопроводность, эквивалентная температуропроводность, звуковые волны, температурные волны, ограждение зданий, стеклопакет.

Введение

В условиях современного строительства обеспечение высокой энергоэффективности и экологического комфорта зданий является приоритетной научно-технической задачей. Ограждающие конструкции, в особенности многослойные светопрозрачные элементы (стеклопакеты), играют ключевую роль в поддержании нормативного температурно-влажностного режима и защите помещений от шумового загрязнения. Эффективность эксплуатации таких объектов напрямую коррелирует с прецизионным определением их теплофизических и звукофизических параметров.

Классические подходы к оценке эксплуатационных характеристик строительных материалов традиционно предполагают раздельное проведение тепловых и акустических испытаний. Это требует использования различных исследовательских стендов, значительно увеличивает временные затраты и может вносить дополнительные погрешности при сопоставлении данных, полученных в неодинаковых условиях среды. В связи с этим концептуально важной задачей становится разработка комплексных методов диагностики.

В данной работе представлен авторский метод исследования свойств ограждающих конструкций, защищенный патентом на изобретение [1]. Ключевым отличием и главным преимуществом предложенного подхода является возможность одновременной идентификации тепловых и акустических параметров материала в рамках единого экспериментального цикла.

Теоретический базис исследования опирается на фундаментальную теорию теплосвуковой аналогии и физико-математическую модель нестационарных температурных полей [2]. Целью настоящей работы является теоретическое обоснование волновой природы распространения тепловых возмущений в изотропных средах и экспериментальная верификация разработанной

математической модели на примере однокамерного стеклопакета. Доказательство математической идентичности процессов переноса теплоты и распространения плоской акустической волны открывает новые перспективы для точного прогнозирования энергоэффективности и звукоизоляционных качеств строительных систем.

Материалы и методы

Эффективность эксплуатации современных зданий напрямую коррелирует с прецизионным определением теплофизических и звукофизических параметров ограждающих конструкций. Обеспечение нормативного температурно-влажностного режима и акустического комфорта требует применения инновационных материалов и методов их контроля. В данной работе представлен авторский метод исследования свойств стеклопакетов, защищенный патентом на изобретение [1]. Ключевым отличием предложенного подхода является возможность одновременной идентификации тепловых и акустических параметров материала в рамках единого экспериментального цикла.

Теоретический базис исследования опирается на фундаментальную теорию теплозвуковой аналогии и физико-математическую модель температурных полей [2]. В рамках математического эксперимента рассматривается изотропная плоская пластина с константными физическими характеристиками. Использование закона косинуса для описания волновых процессов позволило выявить аналитические зависимости, характерные для распространения температурных и звуковых возмущений в твердых телах.

Апробация модели проведена путем сопоставления теоретических данных с результатами натурных измерений температуры и плотности теплового потока на поверхности образца. По итогам исследования верифицирован комплекс свойств: эквивалентная тепло- и температуропроводность, объемная теплоемкость, а также динамические показатели — поверхностная скорость температурной волны и акустическая скорость звука. Разработанная методика существенно повышает точность прогнозирования энергоэффективности и звукоизоляционных качеств строительных объектов.

Процесс нестационарного переноса теплоты в рассматриваемой изотропной пластине описывается дифференциальным уравнением параболического типа [3]:

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

где T — температура; τ — время; a — температуропроводность; x — пространственная координата.

Для решения данной задачи устанавливаются следующие краевые условия:

- начальное условие (распределение температуры равномерно по всей толщине): $T_{\tau=0} = T_0$;
- граничное условие первого рода (температура поверхности мгновенно принимает значение среды и остается постоянной): $T_{x=0} = T_C$.
- граничное условие на противоположной поверхности: в зависимости от условий эксперимента здесь может наблюдаться либо теплообмен по закону Ньютона — Рихмана, либо условие симметрии (адиабатическая стенка) при двустороннем нагреве.

Для решения дифференциального уравнения теплопроводности (1) и упрощения аналитических выкладок целесообразно перейти от абсолютных температур к безразмерным избыточным температурам. Это позволяет стандартизировать решение и исключить влияние начальных условий на структуру уравнения:

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

Использование избыточных температур позволяет применить метод разделения переменных (метод Фурье). Решение представляется в виде бесконечного сходящегося ряда экспонент, где каждый член ряда характеризует скорость затухания температурных возмущений.

Тогда уравнение (1) для пластины примет вид

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

Интенсивный тепловой поток, воздействующий на внешнюю грань пластины, инициирует в ее структуре нестационарный процесс, сопоставимый с распространением энергетического фронта. Эта температурная волна мигрирует вглубь материала без перемещения его масс, при этом ее амплитуда неуклонно затухает по мере удаления от источника. Глубина поглощения тепловой энергии и характер ее распределения жестко лимитированы геометрическими параметрами (толщиной) и временным интервалом. Динамика трансформации температурного поля при этом проходит путь от первичного теплового возмущения до формирования стабилизированного, стационарного режима.

Температурное поле на нагреваемой поверхности пластины $T_{П1}$ эволюционирует по экспоненциальному закону, начиная с начального значения T_0 и асимптотически приближаясь к стационарному значению T_n . Аналогично температура на охлаждаемой поверхности пластины $T_{П2}$ претерпевает временную эволюцию, стартуя от начальной температуры T_0 и достигая установившегося состояния T_x (стационарный тепловой режим).

При асимметричном тепловом воздействии на пластину система, по истечении упорядоченного периода, переходит в режим установившегося теплового равновесия.

Частота колебаний температурной полуволны имеет форму уравнения

$$\nu = 1 / \tau^*.$$

Частота полной гармонической температурной волны имеет форму уравнения

$$\nu = 1 / 2\tau^*.$$

В условиях стационарного теплового режима пространственное распределение температуры по толщине материала подчиняется закону Фурье:

$$q = -\lambda \frac{\partial \vartheta_{x, \tau}}{\partial x}.$$

При достижении пластиной стационарного теплового состояния, соответствующего временному интервалу τ^* , значение безразмерного времени (числа Фурье) находится по формуле

$$Fo = \frac{a \tau^*}{\delta^2}.$$

Величину разности температур находят используя следующую расчетную зависимость:

$$\Delta T^* = T_n - T_x, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где T_n — температура нагревателя, $^\circ\text{C}$; T_x — температура холодильника, $^\circ\text{C}$.

Интенсивность теплового потока в теле пластины определяется при помощи следующего математического выражения:

$$q_{\text{пл}}^* = \lambda \frac{\Delta T^*}{\delta} = \frac{\lambda}{\delta} (T_n - T_x), \text{ Вт/м}^2,$$

где λ — теплопроводность, Вт/(м · К); δ — толщина, м; T_n — температура нагревателя, $^\circ\text{C}$; T_x — температура холодильника, $^\circ\text{C}$.

При достижении пластиной стационарного состояния τ^* расчет коэффициента теплопроводности производится исходя из известных значений поверхностной плотности теплового потока $q_{\text{пл}}^*$, геометрической толщины δ и возникающего перепада температур ΔT^* :

$$\lambda = \frac{q_{\text{пл}}^* \cdot \delta}{\Delta T^*} = \frac{q_{\text{пл}}^* \cdot \delta}{T_n - T_x}, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

где $q_{\text{пл}}^*$ — плотность теплового потока в стационарном режиме, Вт/м²; δ — толщина, м; T_n — температура нагревателя, $^\circ\text{C}$; T_x — температура холодильника, $^\circ\text{C}$.

Существует установленная взаимосвязь между такими характеристиками материала, как коэффициенты тепло- и температуропроводности, плотность, а также удельная (массовая) и объемная теплоемкости, которая выражается следующими зависимостями:

$$a = \lambda / (c\rho), \text{ м}^2/\text{с};$$

$$\lambda = a(c\rho), \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$(c\rho) = \lambda / a, \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)};$$

$$c = (c\rho) / \rho, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)},$$

где λ — теплопроводность, Вт/(м · К); $(c\rho)$ — объемная теплоемкость, Дж/(м³ · К); a — температуропроводность, м²/с; c — весовая (массовая) теплоемкость, Дж/(м² · К); ρ — плотность, кг/м³.

Важно подчеркнуть идентичность математической структуры дифференциального уравнения теплопроводности (1) и волнового уравнения, описы-

вающего плоскую акустическую волну, что проявляется в идентичном виде их математических моделей и частных решений.

Угловые частоты колебаний в пластине — термических ω_T и акустических ω_A — имеют следующие расчетные значения:

$$\omega_T = 2\pi / z, \text{ 1/с;}$$

$$\omega_A = 2\pi f, \text{ 1/с,}$$

где z — полный период колебания температурной волны, с; f — частота звуковых колебаний, с^{-1} .

При анализе процесса нагрева пластины до стационарной фазы становится очевидным, что параметр τ^* характеризует лишь полупериод температурной волны. Математически это соотношение выглядит так:

$$z = 2\tau^*, \text{ с,}$$

где τ^* — время наступления стационарного теплового режима, с.

Таким образом, расчетная формула для круговой частоты температурных волн в рассматриваемой пластине может быть представлена так:

$$\omega_T^{\text{пл}} = \frac{2\pi}{z} = \frac{2\pi}{2\tau^*} = \frac{\pi}{\tau^*}, \text{ 1/с,} \quad (2)$$

где z — полный период колебания температурной волны, с; τ^* — время наступления стационарного теплового режима, с.

Опираясь на патентные данные [4], можно представить волновые числа температурной и звуковой составляющих k_T и k_A в следующем виде:

$$k_T = \sqrt{\frac{\omega_T}{2a}}, \text{ м}^{-1}, \quad (3)$$

$$k_A = \frac{\omega_A}{C_A}, \text{ м}^{-1},$$

где ω_T — угловая (круговая) частота колебаний температурной волны, 1/с; ω_A — угловая (круговая) частота колебаний акустической волны, 1/с; a — температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$; C_A — скорость звука, м/с; f — частота звука, с^{-1} .

На основании ранее приведенных выражений (2) и (3) волновое число, соответствующее состоянию пластины при τ^* , принимает следующий вид:

$$k_T^{\text{пл}} = \sqrt{\frac{\pi}{2a \cdot \tau^*}}, \text{ м}^{-1}, \quad (4)$$

где a — температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$; τ^* — время наступления стационарного теплового режима, с.

Следовательно, при известном значении волнового числа, расчет температуропроводности материала пластины для момента установления стационарного режима τ^* может быть выполнен на базе выражения (4):

$$a = \pi / \left[2\tau^* \left(k_T^{\text{пл}} \right)^2 \right], \text{ м}^2/\text{с},$$

где τ^* — время наступления стационарного теплового режима, с; $k_T^{\text{пл}}$ — волновое температурное число в пластине, м^{-1} .

При установившемся тепловом режиме значение косинусоиды температурной волны в пластине стремится к 1:

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

где ω — угловая (круговая) частота колебаний температурной волны, $1/\text{с}$; τ — время наступления стационарного теплового режима, с; k — волновое число, м^{-1} ; x — текущая координата по толщине образца, м.

При достижении стационарной фазы теплового процесса математическая модель температурной волны принимает следующую форму:

$$\vartheta_{x,\tau} = \vartheta_{\Pi}^{\text{max}} \cdot e^{-k_T x}, \quad (5)$$

где: $\vartheta_{\Pi}^{\text{max}}$ — максимальная избыточная температура, $^{\circ}\text{C}$; e — математическая константа, равная 2,718; k_T — волновое температурное число, м^{-1} ; x — текущая координата по толщине образца, м.

При прохождении звуковой волны распределение акустического давления внутри материала $P_{x,\tau}$ обусловлено его значением на поверхности P_m^{max} и описывается зависимостью

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

где P_m^{max} — максимальное избыточное давление на поверхности, Па; e — математическая константа, равная 2,718; k_A — волновое число звуковой (акустической) волны, м^{-1} ; x — текущая координата по толщине образца, м.

Методология расчета волнового числа в пластине при любых условиях проникновения гармонических колебаний выполнена по методике [2].

Экспериментальная программа определения теплофизических и звукофизических свойств материалов реализована на образце однокамерного стеклопакета конструкции 4—16—4. Условия проведения опытов включали изменение температур на нагревающей границе (нагревателя T_n) и охлаждающей границе (холодильника T_x). Стеклопакет представляет собой двухслойную конструкцию: два стеклянных пласта по $\delta_{\text{ст}} = 4$ мм, между которыми расположена воздушная полость толщиной $\delta_{\text{возд}} = 16$ мм. Распространение температурной волны в такой композитной среде осуществляется через оба компонента системы — стекло и воздушный промежуток. Полученная многослойная структура может быть описана как эквивалентный однородный материал с усредненными параметрами: эквивалентной теплопроводностью $\lambda_{\text{экв}}$, эквивалентной температуропроводностью $a_{\text{экв}}$, эквивалентной скоростью звука $C_{\text{экв}}$ и другими физическими характеристиками.

На рис. изображена конфигурация экспериментального стенда с интегрированным в него образцом однокамерного стеклопакета.



Конфигурация экспериментального стенда с интегрированным в него образцом
однокамерного стеклопакета

Результаты

Для определения тепловозукофизических характеристик стеклопакета использовались следующие параметры образца [5]. Геометрические и температурные характеристики: толщина образца составила $\delta = 0,024$ м при начальной температуре $t_0 = 25,9$ °С. Температурный градиент поддерживался между нагревателем ($T_n = 42,0$ °С) и холодильником ($T_x = 22,0$ °С).

Тепловые параметры: в условиях стационарного теплового режима, наступившего через $\tau_p = 43$ мин, плотность теплового потока достигла значения $q_n^* = 131$ Вт/м². Максимальная интенсивность теплопередачи составила $q_n^{\max} = 230$ Вт/м² и была зафиксирована на $\tau_p = 35$ мин эксперимента.

Величина амплитуды температурных колебаний полуволны определяется посредством соответствующей математической зависимости и принимает следующее численное значение:

$$\vartheta_n = 0,5(T_n - T_x) = 0,5(42 - 22) = 10, \text{ °С},$$

где T_n — температура нагревателя, °С; T_x — температура холодильника, °С.

Коэффициент теплоусвоения определяется посредством соответствующей математической зависимости и принимает следующее численное значение:

$$B = q_n^* / \vartheta_n = 131 / 10 = 13,1, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)},$$

где q_n^* — плотность стационарного теплового потока, Вт/м²; ϑ_n — амплитуда колебаний температурной полуволны, °С.

Эквивалентное термическое сопротивление определяется посредством соответствующей математической зависимости и принимает следующее численное значение:

$$R_{\text{эКВ}} = \frac{T_{\text{н}} - T_{\text{х}}}{q_n^*} = (42 - 22) / 131 = 0,153, \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт},$$

где $T_{\text{н}}$ — температура нагревателя, °С; $T_{\text{х}}$ — температура холодильника, °С.

В момент установления стационарного теплового режима волновое температурное число рассчитывается с использованием соответствующей математической зависимости и принимает следующее численное значение:

$$k_T^{\text{пл}} = H / \delta = 1,414 / 0,024 = 59, \text{ м}^{-1},$$

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

Эквивалентная теплопроводность определяется посредством соответствующей математической зависимости и принимает следующее численное значение:

$$\lambda_{\text{эКВ}} = B / (H \cdot k_T^{\text{пл}}) = 13,1 / (1,414 \cdot 59) = 0,157, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

где B — коэффициент теплоусвоения, Вт/(м² · К); H — безразмерное волновое число; $k_T^{\text{пл}}$ — волновое температурное число, м⁻¹.

Объемная теплоемкость определяется посредством соответствующей математической зависимости и принимает следующее численное значение:

$$(c\rho) = \frac{B^2 \tau}{\pi \lambda} = (13,1^2 \cdot 2580) / (3,14 \cdot 0,157) = 898 \cdot 10^3, \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)},$$

где B — коэффициент теплоусвоения, Вт/(м² · К); τ — время наступления стационарного теплового режима, с; $\lambda_{\text{эКВ}}$ — эквивалентная теплопроводность, Вт/(м · К).

Тепловая инерция определяется посредством соответствующей математической зависимости и принимает следующее численное значение:

$$b = \lambda (c\rho) = 0,157 (898 \cdot 10^3) = 0,141 \cdot 10^6, \text{ Дж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2),$$

где $\lambda_{\text{эКВ}}$ — эквивалентная теплопроводность, Вт/(м · К); $(c\rho)$ — объемная теплоемкость, Дж/(м³ · К).

Тепловая активность определяется посредством соответствующей математической зависимости и принимает следующее численное значение:

$$b^* = \sqrt{b} = \sqrt{0,141 \cdot 10^6} = 0,375 \cdot 10^3, \text{ Дж/(с}^{0,5} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К)},$$

где b — тепловая инерция, Дж²/(с · м⁴ · К²).

В патентной документации [4] представлено подробное описание теплопроводности как одного из основных теплофизических параметров.

Термопроводность определяется посредством соответствующей математической зависимости и принимает следующее численное значение:

$$\alpha_{\text{терм}} = 10^{-0,434 \cdot k_T \cdot \delta} = 10^{-0,434 \cdot 59 \cdot 0,024} = 0,24,$$

где $k_T^{\text{пл}}$ — волновое температурное число образца, м^{-1} ; δ — толщина образца, м.

Термоизоляция определяется посредством соответствующей математической зависимости [4] и принимает следующее численное значение:

$$R_{\text{терм}} = 4,34 \left(k_T^{\text{пл}} \cdot \delta \right) = 4,34 \cdot 59 \cdot 0,024 = 6,15, \text{ дБ}, \quad (7)$$

где 4,34 математическая константа, равная $10 \cdot \lg(e)$; $k_T^{\text{пл}}$ — волновое температурное число образца, м^{-1} ; δ — толщина образца, м.

Из выражения (7) следует, что повышение эффективности термоизоляции обусловлено комплексным воздействием трех факторов: увеличением геометрической толщины образца, уменьшением коэффициента температуропроводности материала и минимизацией времени установления стационарного теплового режима.

Эквивалентная температуропроводность определяется посредством соответствующей математической зависимости и принимает следующее численное значение:

$$a_{\text{экр}} = \pi / \left[2\tau \left(k_T^{\text{пл}} \right)^2 \right] = 3,14 / [2 \cdot 2580 \cdot 59^2] = 0,175 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с},$$

где τ — время наступления стационарного теплового режима, с; $k_T^{\text{пл}}$ — волновое температурное число, м^{-1} .

Температурный закон дает возможность рассчитать поверхностную скорость распространения плоской температурной волны $S_{\text{п}}$, м/с [2]. Данная величина отражает динамику распространения температурного фронта через пластину от нагревателя к холодильнику при заданной поверхностной плотности $\rho_{\text{п}}$, $\text{кг}/\text{м}^2$.

Поверхностная скорость температурной волны определяется посредством соответствующей математической зависимости и принимает следующее численное значение:

$$S_{\text{п}} = a_{\text{экр}} / \delta = 0,175 \cdot 10^{-6} / 0,024 = 7,29 \cdot 10^{-6}, \text{ м/с},$$

где $a_{\text{экр}}$ — эквивалентная температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$; δ — толщина образца, м.

Расчет термического напряжения на поверхности образца (пластины), которое возникает при нагреве образца, проводится согласно установленной формуле, результат которого составляет:

$$\psi_{\text{п}}^{\text{пл}} = 2 / R_{\text{экр}} = 2 / 0,153 = 13,07, \text{ Па} \cdot \text{м},$$

где $R_{\text{экр}}$ — эквивалентное термическое сопротивление стеклопакета, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

Поверхностная плотность определяется посредством соответствующей математической зависимости:

$$\rho_{\text{п}} = \rho \cdot \delta, \text{ кг}/\text{м}^2,$$

где ρ — удельная плотность образца, $\text{кг}/\text{м}^3$; δ — толщина образца, м.

Так как стеклопакет — это многослойная система, состоящая из двух стекол и воздушной прослойки, то поверхностная плотность стеклопакета определяется по формуле

$$\rho_{\Pi} = \rho_{\Pi(\text{ст})} + \rho_{\Pi(\text{возд})} = 2500 \cdot 0,008 + 1,2 \cdot 0,016 = 20,1, \text{ кг/м}^2,$$

где $\rho_{\Pi(\text{ст})}$ — поверхностная плотность стекла, кг/м^2 ; $\rho_{\Pi(\text{возд})}$ — поверхностная плотность воздуха, кг/м^2 ; $\rho_{\text{ст}}$ — удельная плотность стекла, равна 2500 кг/м^3 ; $\rho_{\text{возд}}$ — удельная плотность воздуха, равна $1,2 \text{ кг/м}^3$ при температуре воздуха, равной 20°C .

В соответствии с принципами теплосилового аналогии [2], безразмерное число волновой скорости определяется посредством следующего математического выражения:

$$\Phi_K = S_{\Pi}^2 (\rho_{\Pi} / \psi_{\Pi}^{\text{пл}}) = (7,29 \cdot 10^{-6})^2 (20,1 / 13,1) = 81,54 \cdot 10^{-12},$$

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

Эквивалентная скорость звука стеклопакета определяется посредством соответствующей математической зависимости и принимает следующее численное значение:

$$C_{\text{экв}} = S_{\Pi}^* / \Phi_K = 0,175 \cdot 10^{-6} / 81,54 \cdot 10^{-12} = 2146, \text{ м/с}, \quad (8)$$

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

Эквивалентную скорость многослойной плоской системы материалов и изделий ограждений зданий и сооружений можно определить на основе математического эксперимента по соотношению

$$C_{\text{экв}} = \frac{\sum C_i \cdot \delta_i}{\sum \delta_i}, \quad (9)$$

где C_i — скорость звука i -го материала (вещества), м/с ; δ_i — толщина материала или прослойки, м.

Эквивалентная скорость звука стеклоблока (4—16—4), состоящего из двух стекол и воздушной прослойки, согласно выражению (9), определяется по формуле (10) методом математического эксперимента и численно равна:

$$C_{\text{экв}} = \frac{C_{\text{ст}} \cdot \delta_{\text{ст}} + C_{\text{возд}} \cdot \delta_{\text{возд}}}{\delta_{\text{ст}} + \delta_{\text{возд}}} = \frac{(5660 \cdot 0,008) + (343 \cdot 0,016)}{0,008 + 0,016} = 2117, \text{ м/с}, \quad (10)$$

где $C_{\text{ст}} = 5660 \text{ м/с}$ — скорость звука в неограниченной среде стекла при удельной плотности стекла $\rho_{\text{ст}} = 3250 \text{ кг/м}^3$; $C_{\text{возд}} = 343 \text{ м/с}$ [6] — скорость звука для воздуха при температуре 20°C и удельной плотности воздуха $\rho_{\text{возд}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$; $\delta_{\text{ст}}$ — толщина двух стекол, равна $0,008 \text{ м}$ ($4 \text{ мм} \times 2 = 8 \text{ мм}$); $\delta_{\text{возд}}$ — толщина воздушной прослойки, равна $0,016 \text{ м}$.

Обсуждение

Расхождение рассчитанной по формуле (8) эквивалентной скорости звука стеклоблока $C_{\text{экв}} = 2117$ м/с и по формуле (10) эквивалентной скорости звука стеклоблока (4—16—4), полученной экспериментально, $C_{\text{экв}} = 2146$ м/с составляет 1,35 %.

В табл. приведены полученные экспериментальные значения теплозвукофизических свойств однокамерного стеклопакета (4—16—4).

Теплозвукофизические свойства однокамерного стеклопакета (4—16—4)

Параметр	Экспериментальные значения
1. Начальная температура t_0 , °C	25,9
2. Температура нагревателя $t_{\text{н}}$, °C	42
3. Температура холодильника $t_{\text{х}}$, °C	22
4. Удельная плотность стекла $\rho_{\text{ст}}$, кг/м ³	2500
5. Эквивалентная теплопроводность λ , Вт/(м · К)	0,157
6. Объемная теплоемкость c_p , кДж/(м ³ · К)	898
7. Эквивалентная температуропроводность $a \cdot 10^6$, м ² /с	0,175
8. Звуковая скорость экспериментальная, м/с	2146
9. Звуковая скорость эквивалентная, м/с (по ф. 10)	2117
10. Относительная погрешность по скорости звука, %	1,35

Исследование теплофизических и акустических свойств различных материалов различными методами рассматривалось отечественными и зарубежными авторами [7—25].

Однако определение теплозвукофизических свойств стеклопакетов методом теплозвуковой аналогии рассмотрено впервые.

Заключение

Предложенный метод дает возможность синхронно вычислять как теплофизические, так и акустические характеристики материала (в частности, скорость звука) в рамках единого экспериментального исследования. На базе теплозвуковой аналогии и проведенного математического эксперимента рассчитаны коэффициент теплопроводности и параметр термоизоляции. Установлено, что эффективность обоих показателей возрастает (коэффициент теплопроводности снижается, а термоизоляция улучшается) при увеличении толщины пластины δ , снижении коэффициента температуропроводности a и сокращении времени выхода на стационарный тепловой режим τ^* .

Кроме того, созданная авторами методика расчета волнового числа применима при любой доле проникновения гармонических колебаний, что представляет существенную ценность для практических испытаний.

В целом уникальность методики заключается в возможности параллельного определения термических и акустических характеристик (включая скорость звука) в ходе одного эксперимента.

Кроме того, проведенный математический эксперимент позволил определить эквивалентную скорость звука в материале.

Расхождение полученных значений скорости звука экспериментальным способом и с помощью математического эксперимента составляет не более 1,35 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Способ определения комплекса тепловозукофизических и механических характеристик твердых материалов : тат. № 2801079 Рос. Федерация : МПК⁸ G 01 N 25/18, G 01 N 3/54 / Фокин В. М., Ковылин А. В. ; заявитель и патентообладатель Ковылин А. В. № 2023104914 ; заявл. 01.03.2023 ; опубл. 01.08.2023, Бюл. № 22.
2. Фокин В. М., Ковылин А. В., Усадский Д. Г. Тепловозуковая аналогия : моногр. / Под ред. В. М. Фокина. СПб. : Наукоемкие технологии, 2023. 263 с.
3. Fourier J. B. J. Théorie analytique de la chaleur. Paris : Firmin Didot, père et fils, 1822. 639 p.
4. Способ определения комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов : пат. № 2788562 Рос. Федерация : МПК⁸ G 01 N 25/18, G 01 N 3/54 / Фокин В. М., Ковылин А. В. ; заявитель и патентообладатель Ковылин А. В. № 2022116216 ; заявл. 16.06.2022 ; опубл. 23.01.2023, Бюл. № 3.
5. Фокин В. М., Ковылин А. В., Усадский Д. Г., Попова А. В. Теплофизические свойства светопрозрачных конструкций : моногр. СПб. : Лань, 2018. 96 с.
6. Иофе В. К., Корольков В. Г., Сапожков М. А. Справочник по акустике / Под ред. М. А. Сапожкова. М. : Связь, 1979. 312 с.
7. Дмитривич А. Д. Определение теплофизических свойств строительных материалов. М. — Л. : Гостройиздат, 1963. 204 с.
8. Соколов Н. А., Горшков А. С. Теплопроводность строительных материалов и изделий: уровень гармонизации российских и европейских стандартов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2014. № 6(185). С. 27—31.
9. 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. Iss. 7. Pp. 3115—2120.
10. 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. Vol. 16. Iss. 7. Pp. 3121—3127.
11. Investigation of the thermophysical characteristics of minerals at various heating parameters / K. M. Shaimerdenova, M. Stoev, G. K. Sekerbayeva, G. A. Bulkaïrova, D. A. Ospanova, A. S. Tussyrbayeva, A. Rakhmankyzy // Eurasian Physical Technical Journal. 2021. Vol. 18. Iss. 1. Pp. 70—74.
12. Mikailsoy F. D. On the influence of boundary conditions in modeling heat transfer in soil // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2017. Vol. 90. Iss. 7. Pp. 67—79.
13. 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. Iss. 30. Pp. 1—7.
14. 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. 2016. Pp. 978—982.
15. Yur'ev B. P., Gol'tsev V. A. Thermophysical properties of Kachkanar titanomagnetite pellets // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. Iss. 5. Pp. 329—333.
16. Dzhuraev D. S., Safarov M. M. Studies of thermophysical properties of ferrofluids // Measurement Techniques. 2016. Vol. 59. Iss. 7. Pp. 743—746.
17. 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. P. 022072.
18. Kryuchkov O. B., Malenko P. I., Kononov 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 // Black Metals. 2018. No. 12. Pp. 4—40.
19. Брайцев Э. В., Суссе М., Ватин Н. И. Определение звукоизоляции воздушного шума перегородок готовых сантехнических модулей компании «Modulbau» Россия // Неделя науки ИСИ : материалы Всерос. конф. : в 3 ч. Ч. 2. СПб., 2021. С. 123—126.
20. Соколов Н. А., Солов А. Н. Новый уровень теплофизических измерений в строительстве // Светопрозрачные конструкции. 2018. № 5-6 (121-122). С. 26—28.

21. 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.

22. Чернышов В. Н., Чернышов А. В., Голиков Д. О. Метод и система оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов // Контроль. Диагностика. 2010. № 11. С. 34—41.

23. Беранек Л. Акустические измерения. М.: ИИЛ, 1952.

24. Фокин В. М., Ковылин А. В., Литвинов В. Ф. Неразрушающий контроль комплекса теплофизических свойств твердых материалов с использованием волнового числа // Вестн. ВолгГАСУ. Сер.: Стр.-во и архитектура. 2023. Вып. 3-4(92). С. 126—135.

25. Akchurin T. K., Kovylin A. V., Fokin V. M., Stefanenko I. V. Technique for determining physical properties of building envelopes through temperature wave method // International Review of Civil Engineering. 2025. Vol. 16. Iss. 2. Pp. 113—122. DOI: 10.15866/irece.v16i2.25289.

© Ковылин А. В., Фокин В. М., Усадский Д. Г., Стефаненко Н. И., 2026

Поступила в редакцию
28.04.2026

Ссылка для цитирования:

Ковылин А. В., Фокин В. М., Усадский Д. Г., Стефаненко Н. И. Исследование тепловозвукофизических свойств стеклопакета с использованием тепловозвуковой аналогии // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2026. Вып. 3(104). С. 203—216. DOI: 10.35211/18154360_2026_3_203.

Об авторах:

Ковылин Андрей Васильевич — канд. техн. наук, доц. каф. энергоснабжения, теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; kovylin.andrei@mail.ru

Фокин Владимир Михайлович — д-р техн. наук, проф., проф. каф. энергоснабжения, теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; Fokinvm@mail.ru

Усадский Денис Геннадиевич — канд. техн. наук, доц. каф. энергоснабжения, теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; usadsky@bk.ru

Стефаненко Наталия Игоревна — магистрант каф. энергоснабжения, теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; pr_stefanenko@mail.ru

Andrei V. Kovylin, Vladimir M. Fokin, Denis G. Usadsky, Nataliya I. Stefanenko

Volgograd State Technical University

A METHOD FOR STUDYING THE THERMOSONIC AND PHYSICAL PROPERTIES OF A DOUBLE-GLAZED WINDOW USING A THERMOSONIC ANALOGY

This scientific work is devoted to a comprehensive analysis of the thermophysical and sound-physical characteristics of modern double-glazed windows acting as enclosing structures of buildings. The fundamental basis of the research is the theory of thermosonic analogy, the application of which made it possible to mathematically describe uniform patterns of wave energy transfer in solids. The authors have developed a rigorous analytical model that identifies key dependencies and criteria for the propagation of temperature and acoustic disturbances. The reliability of the theoretical conclusions was confirmed during field experiments. The article describes in detail the test methodology and presents an accurate apparatus that made it possible to determine the equivalent thermal conductivity, volumetric heat capacity, thermal conductivity, surface velocity of a temperature wave, as well as the velocity parameters of sound waves in the sample under study.

Key words: thermosonic analogy, thermosonic and physical properties, equivalent thermal conductivity, equivalent thermal conductivity, sound waves, temperature waves, building fencing, double-glazed windows.

For citation:

Kovylin A. V., Fokin V. M., Usadsky D. G., Stefanenko N. I. [A method for studying the thermosonic and physical properties of a double-glazed window using a thermosonic analogy]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2026, iss. 3, pp. 203—216. DOI: 10.35211/18154360_2026_3_203.

About authors:

Andrei V. Kovylin — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; Kovylin.andrei@mail.ru.

Vladimir M. Fokin — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation, Fokinvm@mail.ru.

Denis G. Usadsky — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; usadsky@bk.ru

Nataliya I. Stefanenko — Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation