

---

## **НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

---

## **SECTION OF SCIENTIFIC METHODOLOGY**

Известия вузов. Строительство. 2023. № 2. С. 101–112.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2023; (2): 101–112.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 691:536.21

DOI: 10.32683/0536-1052-2023-770-2-101-112

### **МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛНОВОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ЧИСЛА**

**Владимир Михайлович Фокин, Андрей Васильевич Ковылин,  
Денис Геннадиевич Усадский**

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

**Аннотация.** Приведенный в статье метод определения теплофизических свойств твердых строительных материалов дополнен измерением плотности теплового потока на поверхности образца и времени его наступления, что позволяет определять коэффициент теплопроводности, температуропроводность и объемную теплоемкость при максимальном значении теплового потока, а именно до наступления стационарного теплового режима. Рассчитаны теплофизические свойства исследуемого материала с помощью волнового температурного числа  $\kappa_t$  в двух режимах измерений. Рассчитанные значения теплофизических свойств подтверждаются математическим экспериментом по выявлению безразмерного числа Фурье при наступлении стационарного теплового режима.

**Ключевые слова:** теплофизические свойства, строительные материалы, теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, волновое температурное число

**Для цитирования:** Фокин В.М., Ковылин А.В., Усадский Д.Г. Метод определения теплофизических свойств твердых материалов с использованием волнового температурного числа // Известия вузов. Строительство. 2023. № 2. С. 101–112. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-770-2-101-112.

Original article

### **METHOD FOR DETERMINING THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF SOLID MATERIALS USING THE WAVE TEMPERATURE NUMBER**

**Vladimir M. Fokin, Andrey V. Kovylin, Denis G. Usadsky**  
Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

**Abstract.** The method given in the article for determining the thermophysical properties of solid building materials is supplemented by measuring the density of the heat

flux on the surface of the sample and the time of its occurrence, which allows determining the coefficient of thermal conductivity, thermal conductivity and volumetric heat capacity at the maximum value of the heat flux, namely, before the onset of a stationary thermal regime. The thermophysical properties of the material under study are calculated using the wave temperature number  $\kappa_t$  in two measurement modes. The calculated values of the thermophysical properties are confirmed by a mathematical experiment to identify the dimensionless Fourier number at the onset of a stationary thermal regime.

**Keywords:** thermophysical properties, building materials, thermal conductivity, thermal conductivity, heat capacity, wave temperature number

**For citation:** 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): 101–112. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2023-770-2-101-112.

**Введение.** В настоящее время существуют различные методы и реализующие их измерительные средства неразрушающего контроля комплекса теплофизических свойств твердых строительных материалов, применяемых для возведения различных ограждений зданий. Теоретической основой разработанных методов являются физико-математические модели температурных полей в исследуемых объектах при различных видах и режимах теплового воздействия на контролируемые материалы и изделия [1, 2].

Энергосбережение и снижение потерь теплоты в окружающую среду существенно влияют на экологическую ситуацию, технико-экономические показатели и капитальные затраты на ограждения зданий. Для решения этих задач нужно знать теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость.

**Цель работы** – разработка метода определения теплофизических свойств твердых материалов. Решение поставленной задачи основано на принципах физико-математической модели температурных полей при различных видах и режимах теплового воздействия на контролируемые материалы и изделия.

Авторами статьи разработан метод определения теплофизических свойств твердых материалов, который дополнен измерением плотности теплового потока на поверхности образца, и времени, когда плотность теплового потока достигнет максимального значения, и расчетом теплофизических свойств с использованием волнового температурного числа.

Исследование различных материалов с помощью неразрушающего контроля, а также изучение различных методов определения теплофизических свойств материалов рассматривалось отечественными и зарубежными авторами [3–16]. Образец для экспериментального исследования – оргстекло, выбран в качестве материала с известными теплофизическими свойствами.

Предлагаемая авторами методика определения комплекса теплофизических свойств твердых материалов заключается в следующем. На середину поверхности образца из оргстекла были установлены датчик измерения температуры и датчик теплового потока. Образец толщиной  $b$  устанавливается между нагревателем и холодильником в экспериментальную установку, где задается температура нагрева  $T_H$  и температура охлаждения  $T_x$ . Одно-

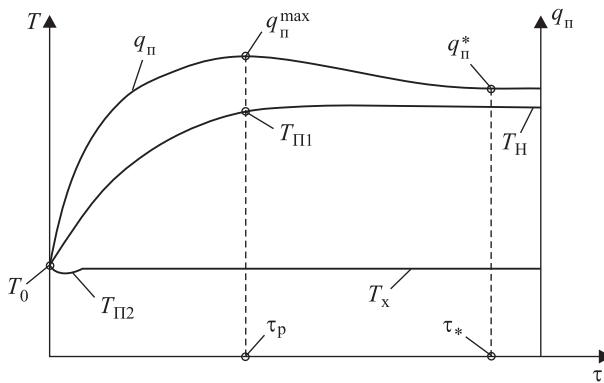


Рис. 1. Распределение температур и теплового потока по толщине образца

$T_H$ ,  $T_x$  – экспериментальное распределение температуры оргстекла со стороны нагревателя и холодильника,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\Pi 1}$  – температура образца со стороны нагревателя при максимальном значении плотности теплового потока,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\Pi 2}$  – температура образца со стороны холодильника,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_0$  – начальная температура образца,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $q_n$  – экспериментальное распределение плотности теплового потока в образце со стороны нагревателя,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $q_n^{\max}$  – максимальное значение плотности теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $q_n^*$  – плотность стационарного теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $\tau_p$  – время достижения максимального теплового потока, с;  $\tau_*$  – время наступления стационарного теплового режима, с

Fig. 1. Distribution of temperatures and heat flow over the thickness of the sample

$T_H$ ,  $T_x$  – experimental temperature distribution of plexiglass from the heater side and from the refrigerator side,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\Pi 1}$  – sample temperature from the heater side at the maximum value of the heat flux density,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\Pi 2}$  – temperature of the sample from the refrigerator side,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_0$  – initial temperature of the sample,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $q_n$  – experimental distribution of the heat flux density in the sample from the heater side,  $\text{Vt}/\text{м}^2$ ;  $q_n^{\max}$  – the maximum value of the heat flux density,  $\text{Vt}/\text{м}^2$ ;  $q_n^*$  – is the density of the stationary heat flow,  $\text{Vt}/\text{м}^2$ ;  $\tau_p$  – time to reach the maximum heat flow, s;  $\tau_*$  – the time of the onset of the stationary thermal regime, s

время после включения прибора производится запись температуры на поверхности образца со стороны нагревателя  $T_{\Pi 1}$  и холодильника  $T_{\Pi 2}$ , а также значения теплового потока  $q_n$  на поверхности исследуемого образца со стороны нагревателя до наступления стационарного режима.

Общий вид распределения температур на поверхности образца со стороны нагревателя  $T_{\Pi 1}$  и холодильника  $T_{\Pi 2}$ , а также теплового потока  $q_n$  со стороны нагревателя в экспериментальной установке приведен на рис. 1.

После включения устройства измерения температура образца со стороны холодильника  $T_{\Pi 2}$  начинает незначительно изменяться, достигает заданного значения температуры  $T_x$  и становится постоянной  $T_{\Pi 2*} = T_x$ . Температура образца со стороны нагревателя  $T_{\Pi 1}$  начинает расти, достигает своего заданного значения и становится равной температуре нагревателя  $T_{\Pi 1*} = T_H$ , т.е. наступает стационарный тепловой режим. Тепловой поток  $q_n$  тоже изме-

няется: вначале увеличивается во времени, достигает своего максимального значения  $q_{\text{п}}^{\max}$  в момент времени  $\tau_p$ , далее тепловой поток снижается, стабилизируется и становится постоянным во времени.

Авторами проводилось множество серий экспериментальных исследований теплофизических свойств оргстекла на экспериментальной установке. Приведем один из полученных результатов измерений для двух режимов:

- стационарный тепловой режим, т.е. при  $q_{\text{п}}^*$ ;
- режим, при котором определяется достижение плотностью теплового потока своего максимального значения, т.е. при  $q_{\text{п}}^{\max}$ .

**I режим (стационарный), при  $q_{\text{п}}^*$ .** Экспериментальное исследование оргстекла проводится при начальной температуре образца, равной  $T_0 = 20,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Вычислительное устройство экспериментальной установки показало следующие значения:  $\delta$  – толщина образца  $0,0284 \text{ м}$ ;  $T_0$  – начальная температура образца  $20,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_H$  – температура нагревателя  $44,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_x$  – температура холодильника  $16,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $q_{\text{п}}^*$  – значение плотности теплового потока при достижении стационарного теплового режима  $196 \text{ Вт/м}^2$ ;  $\tau_p$  – время наступления стационарного теплового режима  $90 \text{ мин (5400 с)}$ .

Теплопроводность и термическое сопротивление рассчитываются по известным в стационарном тепловом режиме формулам

$$\lambda = \frac{q_{\text{п}}^* \delta}{T_H - T_x} = \frac{196 \cdot 0,0284}{44 - 16} = 0,199 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К}), \quad (1)$$

где  $q_{\text{п}}^*$  – плотность теплового потока в момент наступления стационарного теплового режима,  $\text{Вт/м}^2$ ;

$\delta$  – толщина образца,  $\text{м}$ ;

$T_H$  – температура нагревателя,  $\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

$T_x$  – температура холодильника,  $\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Термическое сопротивление вычисляется по формуле

$$R = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{T_H - T_x}{q_{\text{п}}^*} = \frac{44 - 16}{196} = 0,143 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность,  $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$ .

Теплоусвоение рассчитывается по формуле и численно равно

$$B = 2/R = 2/0,143 = 14,0 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (3)$$

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

Волновое температурное число определяется по формуле и численно равно

$$\kappa_t = H/\delta = 1,4/0,0284 = 49,3 \text{ 1/m}, \quad (4)$$

где  $H$  – безразмерное волновое температурное число в пластине, которое в стационарном тепловом режиме составляет  $1,4$ , доля проникновения температурной волны при этом  $0,24$ .

Теплопроводность также возможно вычислять по формуле

$$\lambda = B / (1,41 \kappa_t) = 14,0 / (1,41 \cdot 49,3) = 0,201 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К}), \quad (5)$$

где  $B$  – теплоусвоение,  $\text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ ;

$\kappa_t$  – волновое температурное число,  $1/\text{м}$ .

Из расчетов видно, что значения теплопроводности, определяемые по формулам (1) и (5), практически равны: 0,199 и 0,201  $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$  соответственно.

Объемная теплоемкость устанавливается по формуле и численно равна

$$(cp) = (B^2 \tau_*) / (\pi \lambda) = [(14,0)^2 \cdot 5400] / (3,14 \cdot 0,199) = 1670038 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К}), \quad (6)$$

где  $\tau_*$  – время наступления стационарного теплового режима, с.

Температуропроводность рассчитывается по формуле и численно равна

$$a = \pi / [2 \tau_* (\kappa_t)^2] = 3,14 / [2 \cdot 5400 \cdot (49,3)^2] = 0,1196 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}. \quad (7)$$

Температуропроводность также определяется по известной формуле

$$a = \lambda / (cp) = 0,199 / 1670038 = 0,1192 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}, \quad (8)$$

где  $(cp)$  – объемная теплоемкость,  $\text{Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}$ .

Расхождение полученных результатов температуропроводности по формулам (7) и (8) составляет десятитысячные доли:  $0,1196 \cdot 10^{-6}$  и  $0,1192 \cdot 10^{-6}$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ), т.е. значения практически равны.

Авторами был проведен математический эксперимент по выявлению значения теплового потока на поверхности образца со стороны нагревателя в стационарном режиме и значения при этом безразмерного числа Фурье. Было установлено, что при наступлении стационарного теплового режима на поверхности пластины при экспериментальном исследовании на установке ИТП-МГ-250, число Фурье составляет  $Fo = 0,8$  [2]. Формула для расчета числа Фурье имеет вид

$$Fo = (a \tau_*) / \delta^2, \quad (9)$$

где  $a$  – температуропроводность,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\delta$  – толщина исследуемого образца, мм.

Подставив рассчитанное значение температуропроводности (с использованием волнового температурного числа) в формулу (9), получим

$$Fo = (0,1196 \cdot 5400) / (0,0284)^2 = 0,8.$$

Данный расчет, при котором найденное число Фурье равно  $Fo = 0,8$ , подтверждает точность разработанной методики определения теплофизических свойств для стационарного теплового режима.

**II режим, при  $q_{\text{n}}^{\max}$ .** Во втором режиме экспериментально определяется максимальное значение плотности теплового потока и время его достижения. Используя найденное значение максимальной плотности теплового потока, а также температуру поверхности исследуемого образца со стороны нагревателя при максимальной плотности теплового потока, можно рассчитать комплекс теплофизических свойств, а именно объемную теплоемкость, температуропроводность и теплоусвоение.

Чтобы отследить изменение значений плотности теплового потока и выявить ее максимальное значение, на поверхность исследуемого образца со стороны нагревателя устанавливается датчик для измерения плотности теплового потока. В процессе эксперимента тепловой поток начинает возрастать от своего начального до максимального значения  $q_{\text{пп}}^{\max}$ . Также определяется температура на поверхности образца со стороны нагревателя  $T_{\text{П1}}$  во время фиксирования максимального значения теплового потока  $q_{\text{пп}}^{\max}$  на поверхности  $T_{\text{П1}}$  и время  $\tau_p$  наступления  $q_{\text{пп}}^{\max}$ .

С помощью полученных значений температуры поверхности оргстекла со стороны нагревателя и плотности теплового потока находилось значение температуры при максимальном значении теплового потока  $q_{\text{пп}}^{\max}$ .

Максимальная амплитуда колебаний температурной полуволны на поверхности материала со стороны нагревателя вычисляется по формуле

$$\vartheta_{\text{пп}}^{\max} = 0,5(T_{\text{П1}} - T_0), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (10)$$

где  $T_{\text{П1}}$  – температура поверхности образца со стороны нагревателя при максимальном значении теплового потока,  $^\circ\text{C}$ ;

$T_0$  – начальная температура поверхности образца со стороны нагревателя,  $^\circ\text{C}$ .

Теплоусвоение рассчитывается по формуле

$$B = q_{\text{пп}}^{\max}/\vartheta_{\text{пп}}^{\max}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (11)$$

где  $q_{\text{пп}}^{\max}$  – максимальная плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$\vartheta_{\text{пп}}^{\max}$  – максимальная амплитуда колебаний температурной полуволны,  $^\circ\text{C}$ .

Объемная теплоемкость вычисляется по формуле:

$$(cp) = (B^2 z)/(\lambda \cdot 2\pi), \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}), \quad (12)$$

где  $B$  – теплоусвоение,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$z$  – время достижения тепловым потоком своего максимального значения ( $z = \tau_p$ ), с;

$\lambda$  – теплопроводность,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Температуропроводность определяется по известной формуле (8)

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

где  $(cp)$  – объемная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ .

Приведем полученные экспериментальные данные оргстекла. Начальная температура  $T_0 = 20,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Максимальная плотность теплового потока  $q_{\text{пп}}^{\max} = 265,4 \text{ Вт}/\text{м}^2$  при времени  $\tau_p = 69 \text{ мин}$ . В вычислительном устройстве экспериментальной установки были заданы начальные значения для проведения исследования: толщина образца  $\delta = 0,0284 \text{ м}$ ; начальная температура  $T_0$  образца –  $20,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; температура нагревателя  $T_H = 44,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; температура ходильника  $T_x = 16,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; температура  $T_{\text{П1}}$  образца со стороны нагревателя при максимальном значении плотности теплового потока –  $44,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; значение плотности теплового потока  $q_{\text{пп}}^*$  при достижении стационарного теплового

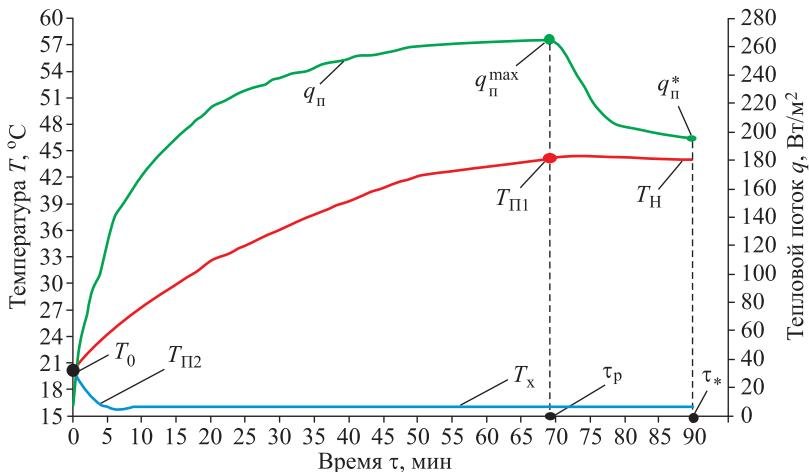


Рис. 2. Экспериментальное распределение температур и теплового потока в образце из оргстекла

Fig. 2. Experimental distribution of temperatures and heat flux in a plexiglass sample

режима составило  $196 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ; время наступления стационарного теплового режима  $\tau_p = 90 \text{ мин}$ .

По полученным экспериментальным данным температур и теплового потока исследуемого образца был построен график (рис. 2).

Максимальная амплитуда колебаний температурной полуволны вычисляется по формуле (10) и составляет

$$\vartheta_{\text{II}}^{\max} = 0,5(T_{\text{II1}} - T_0) = 0,5(44,1 - 20,5) = 11,8 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

где  $T_{\text{II1}}$  – температура поверхности образца со стороны нагревателя при максимальном значении теплового потока,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_0$  – начальная температура поверхности со стороны нагревателя,  $^{\circ}\text{C}$ .

Теплоусвоение вычисляется по формуле (11) и составляет

$$B = q_{\text{II}}^{\max}/\vartheta_{\text{II}}^{\max} = 265,4/11,8 = 22,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где  $q_{\text{II}}^{\max}$  – максимальная плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$\vartheta_{\text{II}}^{\max}$  – максимальная амплитуда колебаний температурной полуволны,  $^{\circ}\text{C}$ .

Объемная теплоемкость определяется по формуле (12) и составляет

$$(cp) = (B^2 \tau_p)/(\lambda \cdot 2\pi) = [(22,5)^2 \cdot 4140]/(0,199 \cdot 2 \cdot 3,14) = 1677076 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}),$$

где  $B$  – теплоусвоение,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$\tau_p$  – время достижения тепловым потоком максимального значения, с;

$\lambda$  – теплопроводность оргстекла, рассчитанная в стационарном режиме,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Волновое температурное число выразим из формулы (5), тогда получим:

$$\kappa_t = B/(1,41\lambda) = 22,5/(1,41 \cdot 0,199) = 80,2 \text{ 1/м}. \quad (13)$$

## Теплофизические свойства оргстекла

### Thermophysical properties of plexiglass

Параметр	I режим, при $q_{\text{II}}^*$	II режим, при $q_{\text{II}}^{\max}$	Табличные значения
Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)	0,199 0,201	0,199	0,191...0,204
Объемная теплоемкость (ср), кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	1670,0	1677,1	1550...1700
Температуропроводность $a \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	0,1196; 0,1192	0,1179; 0,1187	0,11...0,12

Температуропроводность рассчитывается по формуле и составляет

$$a = \pi / [\tau_p(\kappa_t)^2] = 3,14 / [4140 \cdot (80,2)^2] = 0,1179 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}, \quad (14)$$

где  $\kappa_t$  – волновое температурное число, 1/м.

Температуропроводность также вычисляется по известному соотношению и составляет

$$a = \lambda / (\rho c) = 0,199 / 1677076 = 0,1187 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

где  $(\rho c)$  – объемная теплоемкость, Дж/(м<sup>3</sup>·К).

Расхождение полученных результатов температуропроводности по формулам (14) и (18) составляет тысячные доли:  $0,1179 \cdot 10^{-6}$  и  $0,1187 \cdot 10^{-6}$  (м<sup>2</sup>/с), т.е. значения практически равны.

Для наглядности в таблице приведем некоторые экспериментальные данные оргстекла, полученные авторами при разных режимах измерений, а также значения, которые указаны в справочной литературе [17–19].

Проанализировав приведенные в таблице значения теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности оргстекла, можно сделать вывод о минимальном расхождении полученных экспериментальных значений для двух режимов, т. е. о высокой точности разработанной методики, в том числе с использованием волнового числа и числа Фурье. Сравнив полученные экспериментальные данные со справочными, можно сказать, что расхождение между ними составляет не более 5 %, что говорит о надежности применяемого метода.

**Выводы.** 1. Приведенный в статье метод неразрушающего контроля комплекса теплофизических свойств твердых строительных материалов дополнен измерением плотности теплового потока на поверхности образца и времени его наступления, что позволяет определить теплопроводность, температуропроводность и объемную теплоемкость при максимальном значении теплового потока на поверхности пластины, а именно до наступления стационарного теплового режима.

2. Экспериментальные данные теплофизических свойств оргстекла сравнивались со справочными данными, расхождение составляет не более 5 %.

3. Теплофизические свойства исследуемого материала, полученные с помощью двух режимов измерений, показывают минимальное расхождение значений между собой, высокую точность определения свойств и надежность разработанного метода.

4. Рассчитанные значения теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости с помощью волнового числа  $\kappa_t$  согласуются со значениями, полученными с помощью метода, разработанного авторами, расхождение составляет не более 5 %.

5. Значения теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости, рассчитанные с помощью волнового числа  $\kappa_t$ , согласуются со справочными данными, расхождение составляет не более 5 %.

6. Разработанный авторами метод неразрушающего контроля определения теплофизических свойств с использованием максимального теплового потока  $q_{\pi}^{\max}$  позволяет значительно сократить время проведения эксперимента по сравнению со стационарным режимом измерений в несколько раз.

7. Рассчитанные значения температуропроводности оргстекла подтверждают математический эксперимент по выявлению безразмерного числа Фурье при наступлении стационарного теплового режима: число Фурье составляет  $Fo = 0,8$ .

### **Список источников**

1. Пат. № 2767468 Российской Федерации, МПК<sup>8</sup> G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов и устройство для его осуществления / В.М. Фокин, А.В. Ковылин, Д.Г. Усадский; заявитель и патентообладатель ВолгГТУ. № 2021106737; заявл. 16.03.2021; опубл. 17.03.2022; Бюл. № 8.
2. Фокин В.М., Ковылин А.В., Усадский Д.Г. Неразрушающий контроль комплекса теплофизических свойств твердых строительных материалов // Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. 2021. № 2. С. 62–71.
3. Shaimerdenova K.M., Stoev M., Sekerbayeva G.K., Bulkairova G.A., Ospanova D.A., Tussypbayeva A.S., Rakhamkyzy A. Investigation of the thermophysical characteristics of minerals at various heating parameters // Eurasian Physical Technical Journal. 2021. Т. 18, no. 1. P. 70–74.
4. Kovylin A.V., Usadskij D.G., Lepilov V.I. The buildings innovative method fencing thermal regime study // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 698: The International Scientific Conference “Construction and Architecture: Theory and Practice for the innovation Development” (CATPID-2019) 01-05 October 2019, Kislovodsk / eds.: B. Yazyev [et al.]. IOP Publishing, 2019. 6 p.
5. Lepilov V.I., Usadskij D.G., Kovylin A.V. Comparative analysis of thermophysical characteristics for screen insulation and building heat-insulating materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1083: International Scientific Conference "Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development" (CATPID 2020, p. II). 16–17 December 2020, Nalchik, Russian Federation / eds.: B. Yazyev; Don State Technical University. IOP Publishing, 2021. 6 p. (012077).
6. 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. P. 978–982.
7. 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. P. 01–07.
8. Yur'ev B.P., Gol'tsev V.A. Thermophysical properties of kachkanar titanomagnetite pellets // Steel in translation. 2016. P. 329–333.

9. Dzhuraev D.S., Safarov M.M. Studies of thermophysical properties of ferrofluids // Measurement techniques. 2016. P. 743–746.
10. 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.
11. 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 // Ferrous metals. 2018. P. 34–40.
12. Фокин В.М. Научно-методологические основы определения теплофизических свойств материалов методом неразрушающего контроля. М.: Машиностроение-1, 2003. 140 с.
13. Фокин В.М., Ковылин А.В. Теоретические основы определения теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности материалов по тепловым измерениям на поверхности методом неразрушающего контроля // Вестник ВолгГАСУ. Серия «Строительство и архитектура», 2009. Вып. 14. С. 123–127.
14. Усадский Д.Г. Методы технического контроля эффективных энергетических систем зданий и сооружений // Новая наука: стратегии и векторы развития. 2016. № 4-2. С. 181–184.
15. 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.
16. Пат. № 2421711 Российской Федерации, МПК<sup>8</sup> G 01 N 25/00. Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов / В.М. Фокин, А.В. Ковылин; заявитель и патентообладатель ВолгГАСУ. № 2009129316/28; заявл. 29.07.2009; опубл. 10.02.2011; Бюл. № 4. 9 с.
17. Аметистов Е.В., Григорьев В.А., Емцев Б.Т. и др. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справ. / под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с. (Теплоэнергетика и теплотехника).
18. Катаев В.М., Попов В.А., Сажин Б.И. Справочник по пластическим массам. 2-е изд., перераб. и доп. Т. 1. М.: Химия, 1975. 448 с.
19. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник для вузов. М.: Энергия, 1975. 488 с.

## References

1. Patent 2767468 Russian Federation, IPK<sup>8</sup> G 01 N 25/18. Method of non-destructive testing of a complex of thermophysical characteristics of solid building materials and a device for its implementation. V.M. Fokin, A.V. Kovylin, D.G. Usadsky; applicant and patent holder of VolgGTU. No. 2021106737; appl. 16.03.2021; publ. 17.03.2022, Bull. No. 8. (In Russ.).
2. Fokin V.M., Kovylin A.V., Usadsky D.G. Non-destructive control of the complex of thermal properties of hard building materials. *Vestnik VolgGASU. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura = Bull. of VSUACE. Series: Construction and Architecture.* 2021; (2): 62–71. (In Russ.).
3. Shaimerdenova K.M., Stoev M., Sekerbayeva G.K., Bulkairova G.A., Ospanova D.A., Tussypbayeva A.S., Rakhamkazy A. Investigation of the thermophysical characteristics of minerals at various heating parameters. *Eurasian Physical Technical Journal.* 2021; 18(1): 70–74.

4. Kovylin A.B., Usadskiy D.G., Lepilov V.I. The buildings innovative method fencing thermal regime study. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 698: The International Scientific Conference “Construction and Architecture: Theory and Practice for the innovation Development” (CATPID-2019) 01-05 October 2019, Kislovodsk / eds.: B. Yazyev [et al.]. IOP Publishing, 2019. 6 p.
5. Lepilov V.I., Usadskiy D.G., Kovylin A.B. Comparative analysis of thermophysical characteristics for screen insulation and building heat-insulating materials. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1083: International Scientific Conference "Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development" (CATPID 2020, p. II). 16–17 December 2020, Nalchik, Russian Federation / eds.: B. Yazyev; Don State Technical University. IOP Publishing, 2021. 6 p. (012077).
6. 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: 978–982.
7. 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: 01–07.
8. Yur'ev B.P., Gol'tsev V.A. Thermophysical properties of kachkanar titanomagnetite pellets. *Steel in translation.* 2016: 329–333.
9. Dzhuraev D.S., Safarov M.M. Studies of thermophysical properties of ferrofluids. *Measurement techniques.* 2016: 743–746.
10. Shchukina T.V., Sheps R.F., Burak E.E. Energy-saving regimes examination during new generation building structures insolation: international multi-conference on industrial engineering and modern technologies electronic edition. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. P. 022072.
11. 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. *Ferrous metals.* 2018: 34–40.
12. Fokin V.M. Scientific and methodological bases for determining the thermophysical properties of materials by non-destructive testing. Moscow, 2003. 140 p. (In Russ.).
13. Fokin V.M., Kovylin A.V. Theoretical bases for determining the thermal conductivity, volume heat capacity and thermal diffusivity of materials based on thermal measurements on the surface by nondestructive testing. *Vestnik VolgGASU. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura = Bull. of VSUACE. Series "Construction and architecture",* 2009; (14): 123–127. (In Russ.).
14. Usadskiy D.G. Methods of technical control of efficient energy systems of buildings and structures. *Novaya nauka: strategii i vektorы razvitiya = New science: strategies and vectors of development.* 2016; (4-2): 181–184. (In Russ.).
15. Chernyshov V.N., Chernyshov A.V., Golikov D.O. Method and system of operational control of thermophysical characteristics of building materials. *Kontrol: Diagnostika = Control. Diagnostics.* 2010; (11): 34–41. (In Russ.).
16. Pat. 2421711 Russian Federation, IPK8 G 01 N 25/00. Method of non-destructive testing of a complex of thermophysical characteristics of solid building materials. V.M. Fokin, A.V. Kovylin; applicant and patent holder of VolgGASU. No. 2009129316/28; appl. 29.07.2009; publ. 10.02.2011; Bull. no. 4. 9 p. (In Russ.).
17. Ametistov E.V., Grigor'ev V.A., Emcev B.T. et al. Heat and mass transfer. Thermal engineering experiment: Guide. Moscow, 1982. 512 p. (In Russ.).
18. Kataev V.M., Popov V.A., Sazhin B.I. Handbook of plastic masses. Moscow, 1975. 448 p. (In Russ.).
19. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Heat transfer: Textbook for universities. Moscow, 1975. 488 p. (In Russ.).

**Информация об авторах**

**В.М. Фокин** – доктор технических наук, профессор, Fokinvm@mail.ru

**А.В. Ковылин** – кандидат технических наук, доцент

kovylin.andrei@mail.ru

**Д.Г. Усадский** – кандидат технических наук, usadsky@bk.ru

**Information about the authors**

**V.M. Fokin** – DSc, Professor, Fokinvm@mail.ru

**A.V. Kovylin** – PhD, Ass. Professor, kovylin.andrei@mail.ru

**D.G. Usadsky** – PhD, usadsky@bk.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.01.2023

The article was submitted 20.01.2023

Одобрена после рецензирования 20.02.2023

Approved after reviewing 20.02.2023

Принята к публикации 27.02.2023

Accepted for publication 27.02.2023

---