

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-47-59

УДК 697.112.3:620.179.11

## Определение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций

Б. М. Хрусталеv<sup>1)</sup>, В. Д. Сизов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018  
Belarusian National Technical University, 2018

**Реферат.** Проведение мероприятий по увеличению термического сопротивления ограждающих конструкций требует определения их теплофизических характеристик, в основу методов определения которых положено решение задач теплопроводности, устанавливающее связь между пространственно-временными изменениями температуры под действием источника теплоты. В данной работе используется решение задачи при нестационарном нагреве ограждающей конструкции в виде неограниченной пластины при граничных условиях III рода. По известным соотношениям и графикам определяются изменения температуры поверхности от времени прогрева, термического сопротивления конструкции, аргументов  $F_0$  и  $Bi$ , т. е. начальных и граничных условий. Полученные графические зависимости показывают, что температура поверхности зависит от термического сопротивления, а температура на противоположной поверхности за время теплового воздействия практически не изменяется за время  $\tau = 5$  ч. Таким образом, если наружная температура воздуха изменилась, то по скорости изменения температуры поверхности или относительной температуры  $\theta$  можно определить теплофизические характеристики, решая обратную задачу теплопроводности, используя преобразованное соотношение для определения  $R$  как функцию  $R = f(\theta, \tau)$ . Если использовать построенные графические зависимости  $R = f(\theta, \tau)$  при различных коэффициентах теплоотдачи, то по измеренным температурам в различные промежутки времени можно определить термическое сопротивление в эти же промежутки времени и по их среднему значению – искомое сопротивление теплопередаче  $\bar{R}$ . Полученные нами расчетные аналитические соотношения и графические зависимости показывают адекватность проведенным натурным измерениям, если выбирать участки с однородным температурным полем и температурной историей, и их можно использовать при определении сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции в виде неограниченной пластины при граничных условиях III рода.

**Ключевые слова:** ограждающие конструкции, сопротивление теплопередаче, нестационарный режим, аргументы  $F_0$  и  $Bi$ , неограниченная пластина, граничные условия

**Для цитирования:** Хрусталеv, Б. М. Определение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций / Б. М. Хрусталеv, В. Д. Сизов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 1. С. 47–59. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-47-59

---

### Адрес для переписки

Хрусталеv Борис Михайлович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 150,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 265-96-56  
tg\_v\_fes@bntu.by

### Address for correspondence

Khroustalev Boris M.  
Belarusian National Technical University  
150 Nezavisimosti Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 265-96-56  
tg\_v\_fes@bntu.by

---

## Determining Heat Transmission Resistance of Enclosing Structures

B. M. Khroustalev<sup>1)</sup>, V. D. Sizov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Fulfillment of the activities aimed to an increase of the thermal resistance of enclosing structures requires the determination of their thermophysical characteristics with the use of the determination method based on the solution of problems of heat conduction, establishing the connection between the spatial and temporal temperature changes under the effect of heat source. This work uses the solution of the problem under nonstationary heating of the enclosing structure in the form of unrestricted plate with boundary conditions of the III kind. According to the known relations and graphs alterations in surface temperature depending on warm-up time, on thermal resistance of constructions and on arguments of  $Fo$  and  $Bi$ , i. e. initial and boundary conditions are determined. The graphic dependencies that have been obtained show that the surface temperature depends on the thermal resistance, while the temperature at the opposite surface during heat exposure remains practically unchanged during  $\tau = 5$  h. Thus, if the outside air temperature is altered, then the rate of change of surface temperature or relative temperature  $\theta$  make it possible to determine the thermophysical characteristics by solving the inverse problem of thermal conductivity with the use of the converted ratio to determine  $R$  as a function  $R = f(\theta, \tau)$ . If the constructed graphic dependencies  $R = f(\theta, \tau)$  are used at different heat transfer coefficients, then according to the measured temperatures at different time intervals it is possible to determine thermal resistance in the same time intervals and, according to their average value, determine the required resistance to heat transfer  $\bar{R}$ . The estimated ratio of analytical and graphic dependencies that we have obtained demonstrate the adequacy of the conducted full-scale measurements, if the areas with homogeneous temperature field and temperature history are chosen, and they can be used in determining the heat resistance of the enclosing structure in the form of unrestricted plate with boundary conditions of the III kind.

**Keywords:** enclosing structures, heat transmission resistance, non-stationary mode, arguments of  $Fo$  and  $Bi$ , unrestricted plate, boundary conditions

**For citation:** Khroustalev B. M., Sizov V. D. (2018) Determining Heat Transmission Resistance of Enclosing Structures. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (1), 47–59. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-47-59 (in Russian)

Разработка мероприятий по утеплению наружных ограждающих конструкций при возведении и реконструкции зданий проблематична без качественной оценки их теплофизических характеристик, в первую очередь термических сопротивлений, сопротивлений теплопередаче. Особенно это касается ограждений, эксплуатируемых многие десятилетия, так как удельный тепловой поток не может изменяться синхронно с изменением температуры наружного и внутреннего воздуха [1–6].

Для определения фактических значений теплопередачи через ограждающие конструкции необходимо учитывать динамику изменения температур и тепловых потоков на поверхности ограждения.

До настоящего времени отсутствует корректная методика расчета, которая бы с большой достоверностью описывала процесс тепло- и массопереноса, поэтому основные задачи исследований – получение аналитических решений для ряда краевых задач и разработка на их базе метода

аналитико-экспериментального расчета, простого в физическом понимании, удобного в инженерном обращении и обладающего высокой точностью.

При анализе, решении задач переноса теплоты (массы) в различных материалах используют методы:

– линеаризации: алгебраических, интегральных подстановок, интегральных балансов (теплоты и массы), последовательных приближений, малых параметров (возмущений);

– вариационные (Био, Канторовича, Лейбензона, Ритца, Трэфтца и др.) [7];

– проекционные: интегральных тепловых балансов;

– приведения краевых задач с нелинейными граничными условиями (ГУ) к эквивалентным и нелинейным интегральным уравнениям.

Известны условия, когда коэффициенты внутреннего, внешнего тепло- и массопереноса квазистационарны, что справедливо для линейных потоков теплоты и массы, для которых используют методы Фурье, функции Грина, Лапласа, Лапласа – Карсона и др.

Все методики имеют достоинства и недостатки, а следовательно, существуют определенные ареалы задач, которые эффективны при больших или малых числах Фурье и Био.

В основу методов определения теплофизических характеристик материалов положено решение задач теплопроводности, устанавливающее связь между пространственно-временными изменениями температуры тела под действием источника теплоты. Так как температурное поле зависит от его теплофизических характеристик, по известному изменению температуры в одной или нескольких точках исследуемого тела можно рассчитать его коэффициенты тепло- и температуропроводности, а значит, и термическое сопротивление.

Являясь характеристикой пространственного переноса теплоты, теплопроводность проявляется в условиях заметных градиентов температурного поля внутри вещества. Для непосредственного измерения локального градиента температур, чаще всего на основе значений температуры, в характерных точках образца восстанавливают его температурное поле и через него расчетным способом определяют градиенты температуры в тех сечениях образца, для которых экспериментально измерены или заданы удельные тепловые потоки.

В то же время при создании методов и устройств измерения теплопроводности главные затруднения связаны с тем, что необходимо выделить в исследуемом образце изотермическое сечение для установления температурного градиента и удельного теплового потока. С этой целью обычно проводятся измерения на образцах классической формы, например пластине, создавая в ней одномерные температурные поля.

Теоретический анализ краевых задач теплопроводности показывает, что комплексные определения теплофизических характеристик возможны при помощи методов, основанных на решении уравнения нестационарного поля температур. Они свободны от многих недостатков, присущих стационарным методам, однако имеют более высокую погрешность в определе-

нии искомых величин. Преимущество нестационарных методов в том, что из результатов одного непродолжительного опыта можно определить тепло- и температуропроводность исследуемого материала, а в квазистационарном режиме – их температурную зависимость.

На сегодня методы, определяющие теплофизические характеристики, базирующиеся на закономерностях нестационарного теплового потока, разделяются на следующие группы [8]: регулярного теплового режима; основанные на определении параметров нестационарного температурного поля в первой стадии его развития; квазистационарного теплового режима.

Все перечисленные методы в той или иной мере можно использовать для контроля термического сопротивления.

При определении теплофизических характеристик ограждающих конструкций наиболее близкими с физической точки зрения являются процессы нагрева или охлаждения исследуемого тела как неограниченной пластины при граничных условиях III рода – температурный потенциал при одномерном потоке теплоты не достигает противоположной границы за время теплового воздействия.

Например, рассмотрим решение данной задачи при определенных начальных условиях, при котором можно представить графические зависимости изменения температуры поверхности охлаждаемого (нагреваемого) тела в различные отрезки времени в зависимости от начальных теплофизических характеристик.

При этом флюктуации температур при одностороннем подводе теплоты на противоположной плоскости не наблюдаются.

В то же время, используя данные [9], можно сделать вывод, что наиболее близким к описываемому процессу является решение задачи, в отличие от ранее предлагаемого [10], суть которого состоит в следующем.

Начальная температура неограниченной пластины по толщине одинакова. У одной поверхности температура среды известна (задана), на другой поверхности температура равна начальной.

Начальные граничные условия следующие:

$$t|_{\tau=0} = t_{0i}; \quad -\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0} = x(\delta - t_{x=0}); \quad \delta = \text{const}; \quad t|_{x=h} = t_0.$$

Тогда безразмерная относительная и средняя температуры могут быть рассчитаны из следующих уравнений:

– параметр температуры

$$\theta = \frac{t - t_0}{t_0 - t_0} = \frac{\text{Bi} \cdot (1 - \eta)}{\text{Bi} + 1} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin[v_n (1 - \eta) \exp(-v_n^2 \text{Fo})], \quad (1)$$

где  $A_n$  – параметр амплитуды колебаний температуры,

$$A_n = \frac{2\text{Bi}}{\sin v_n (v_n^2 + \text{Bi}^2 + \text{Bi})}; \quad (2)$$

– параметр средней температуры

$$\frac{\bar{t} - t_0}{\vartheta - t_0} = \frac{\text{Bi}}{2(\text{Bi} + 1)} - \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp(-v_n^2 \text{Fo}), \quad (3)$$

где  $B_n$  – относительная величина,

$$\text{Bi}_n = \frac{A_n}{v_n} (1 - \cos v_n); \quad (4)$$

$n$  – число членов ряда;

– аргументы:

$$\text{Fo} = \frac{a\tau}{h^2}; \quad \text{Bi}_i = \frac{\bar{\alpha}_{\text{эк}} h}{\lambda}; \quad \eta = \frac{x}{h},$$

где  $\bar{\alpha}_{\text{эк}}$  – коэффициент теплоотдачи у внешней поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$h$  – толщина слоев ограждающей конструкции, м;  $a = \frac{\lambda_{\text{эк}}}{c_{\text{эк}} \rho_{\text{эк}}}$  – коэффи-

циент температуропроводности, м<sup>2</sup>/ч;  $c_{\text{эк}}$  – массовая изобарная теплоемкость, кДж/(кг·К);  $\lambda_{\text{эк}}$  – коэффициент теплопроводности тела, Вт/(м·К);  $\rho_{\text{эк}}$  – средняя плотность конструкции, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta$  – параметр толщины.

На основании указанных выше формул [9] построены графические зависимости, из которых можно определить искомые значения температур по следующим выражениям:

– температура поверхности в осевой плоскости пластины (ограждения) при  $\eta = 0$  и  $\eta = 0,5$

$$t_n = t_0 + \bar{\theta}(t_n - t_0); \quad (5)$$

– средняя температура

$$\bar{t} = t_0 + \theta(t_n - t_0);$$

– градиент температуры при  $\eta = 1,0$

$$\frac{\partial t}{\partial x} = -G \frac{v - t_0}{h},$$

где  $G = \frac{\text{Bi}}{1 + \text{Bi}}$ .

Рассмотрим пример при следующих начальных условиях:

– для табл. 1:

$h = 0,25$  м;  $\rho = 1100$  кг/м<sup>3</sup>;  $c = 840$  Дж/(кг·К);

$\alpha = 10,0$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $R = 1,0$  м<sup>2</sup>·К/Вт;  $\lambda = 0,25$  Вт/(м·К);

$a = 0,00097$  м<sup>2</sup>/ч;  $t_0 = 0$  °С;  $t_{\text{к}} = -5,0$  °С;

– для табл. 2:

$$R = 2,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}; \quad \lambda = 0,125 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad a = 0,00048 \text{ м}^2/\text{ч};$$

$$\text{Bi} = 20,0; \quad t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_k = -5,0 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\alpha = 10,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Рассчитанные данные сводим в табл. 1 и 2, по которым можно построить графические зависимости  $t = f(\tau, R, \eta)$  (рис. 1).

Таблица 1

$\tau, \text{ч}$	Fo	Bi	$\theta_{\eta=0}$	$t_{\eta=0}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_{\eta=0,5}$	$t_{\eta=0,5}, \text{ }^\circ\text{C}$	$G_{\eta=1,0}$	$\frac{\partial t}{\partial x_{\eta=1,0}}, \text{ }^\circ\text{C}/\text{м}$
1	0,015	10	0,65	-3,25	0,01	0,05	0	0
2	0,030	10	0,74	-3,70	0,03	-0,15	0	0
5	0,070	10	0,82	-4,10	0,1	-0,85	0,80	1,6
10	0,155	10	0,86	-4,30	0,29	-1,45	0,38	7,6

Таблица 2

$\tau, \text{ч}$	Fo	Bi	$\theta_{\eta=0}$	$t_{\eta=0}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_{\eta=0,5}$	$t_{\eta=0,5}, \text{ }^\circ\text{C}$	$G_{\eta=1,0}$	$\frac{\partial t}{\partial x_{\eta=1,0}}, \text{ }^\circ\text{C}/\text{м}$
1	0,03	20	0,80	-4,00	0,05	-0,25	0	0
2	0,06	20	0,85	-4,25	0,12	-0,60	0,40	0,8
5	0,15	20	0,90	-4,50	0,31	-1,55	0,40	8,0
10	0,30	20	0,92	-4,60	0,42	-2,10	0,80	16,0

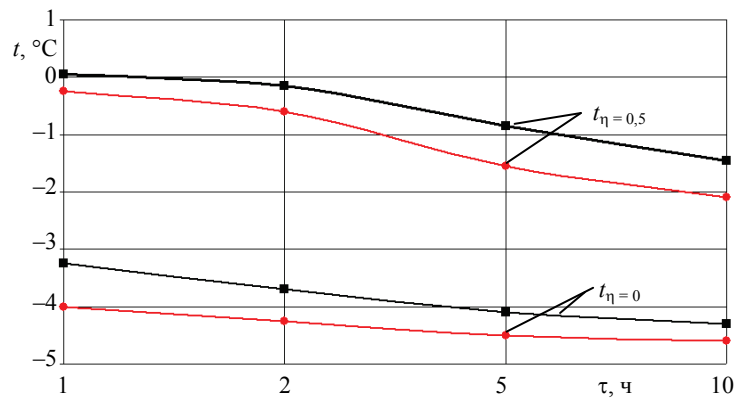


Рис. 1. Зависимости  $t = f(\tau, R, \eta)$ : —■— при  $R = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ;  
—●— при  $R = 2,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$

Fig. 1. Dependencies  $t = f(\tau, R, \eta)$ : —■— when  $R = 1.0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{W}$ ;  
—●— when  $R = 2.0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{W}$

Из рис. 1 следует, что изменения температур поверхности  $t_{\eta=0}$  и в осевой плоскости  $t_{\eta=0,5}$  неограниченной пластины зависят от термического сопротивления материала ограждающей конструкции  $R$  и времени теплового воздействия  $\tau$ .

Вместе с тем при продолжительности воздействия  $\tau$  до 2 ч градиент температуры  $\partial t/\partial x$  на противоположной поверхности практически равен 0 при  $R = 1,0 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$  и при  $R = 2,0 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$  изменяется незначительно, а только при  $\tau > 5$  ч изменения температур существенны, т. е. в этом случае при  $\tau < 3$  ч справедливы ГУ III рода.

Для более тщательного анализа изменений температур наружной поверхности в осевой плоскости пластины и на противоположной поверхности для решения уравнения (1) составлена программа, позволяющая решить данную задачу при различных начальных условиях.

В качестве примера можно привести таблицы полученных результатов:  
 – начальные условия для табл. 3:

$R = 2,0 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ ;  $h = 0,25 \text{ м}$ ;  $\rho = 1100 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $c = 0,840 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  
 $\alpha = 10,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $\lambda = 0,125 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $a = 0,00049 \text{ м}^2/\text{ч}$ ;  
 $Bi = 20,0$ ;  $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{кон}} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

– начальные условия для табл. 4:

$R = 1,0 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ ;  $h = 0,25 \text{ м}$ ;  $\rho = 1100 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $c = 0,840 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  
 $\alpha = 10,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $\lambda = 0,25 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $a = 0,00097 \text{ м}^2/\text{ч}$ ;  
 $Bi = 10,0$ ;  $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{кон}} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Таблица 3

$\tau, \text{ ч}$	Fo	$\theta_{\eta=0}$	$t_{\eta=0}$	$\theta_{\eta=0,5}$	$t_{\eta=0,5}$	$\theta_{\eta=1,0}$	$t_{\eta=1,0}$
0,2	0,0016	0,5749	-5,75	0,1629	-1,63	0	0
0,5	0,0039	0,6468	-6,47	0,1668	-1,67	0	0
0,8	0,0062	0,6949	-6,95	0,1667	-1,67	0	0
1,0	0,0780	0,7187	-7,19	0,1654	-1,65	0	0

Таблица 4

$\tau, \text{ ч}$	Fo	$\theta_{\eta=0}$	$t_{\eta=0}$	$\theta_{\eta=0,5}$	$t_{\eta=0,5}$	$\theta_{\eta=1,0}$	$t_{\eta=1,0}$
0,2	0,00312	0,4318	-4,32	-0,0049	0,049	0	0
0,5	0,00779	0,5398	-5,40	-0,0009	0,009	0	0
0,8	0,01247	0,6025	-6,02	0,0003	-0,003	0	0
1,0	0,01558	0,6319	-6,32	0,0015	-0,015	0	0

На основании полученных расчетных данных построены зависимости температур при  $\eta = 0$ ; 0,5 и 1,0 в разные промежутки времени и при различных величинах термических сопротивлений, которые представлены на рис. 2.

Графики рис. 2 показывают, что изменения температуры поверхности и в осевой плоскости бесконечной пластины зависят от заданных термических сопротивлений и времени воздействия отрицательных наружных температур, и в тот же интервал воздействия ( $\tau_{\text{max}} = 1,0$  ч) градиент температуры не достигает противоположной границы пластины (внутренней поверхности наружного ограждения) при заданных начальных условиях.

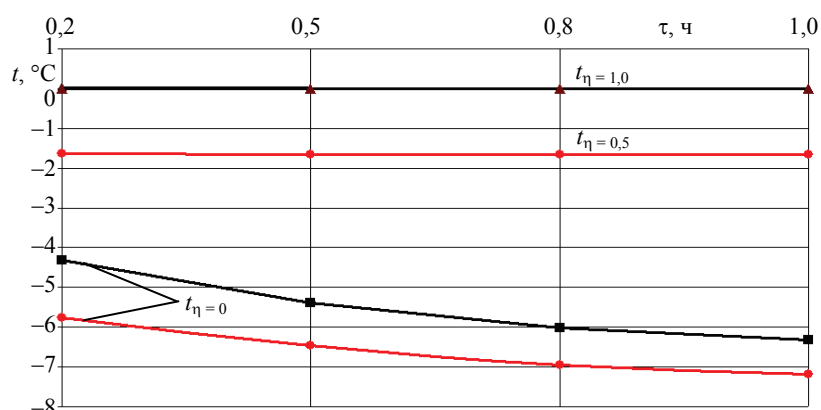


Рис. 2. Зависимости  $t = f(\tau, R, \eta)$ : —■— — при  $R = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ; —●— — при  $R = 2,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ; —▲— — рассчитанные значения температур  $t_{\eta=0,5}$  при  $R = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  малы и графики  $t_{\eta=0,5}$  при  $R = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  и  $t_{\eta=1,0}$  при  $R = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  и  $R = 2,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  фактически совпадают с осью координат

Fig. 2. Dependencies  $t = f(\tau, R, \eta)$ : —■— — when  $R = 1.0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{W}$ ; —●— — when  $R = 2.0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{W}$ ; —▲— — calculated values of temperatures  $t_{\eta=0,5}$  when  $R = 1.0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{W}$  are small and graphics  $t_{\eta=0,5}$  when  $R = 1.0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{W}$  and  $t_{\eta=1,0}$  when  $R = 1.0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{W}$  and  $R = 2.0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{W}$  actually coincide with the axis of the coordinate

При этом продолжительность нестационарного режима сохраняется до времени

$$\tau = \frac{\delta^2}{a} = \frac{0,25^2}{0,00097} = 64 \text{ ч.}$$

Из аналитических расчетов и графиков можно сделать вывод, что если наружная температура воздуха изменилась, то по скорости изменения температуры поверхности или  $\theta$  можно определить теплофизические характеристики, решая обратную задачу теплопроводности или имея набор расчетных зависимостей (графиков), по которым можно построить соответствующую номограмму.

Приведенные выше исследования показывают, что на их основании можно разработать методику и способ определения термического сопротивления при нестационарном режиме охлаждения (нагрева) конструкций для ГУ III рода.

Способ определения теплопередачи ограждающих конструкций при тепловизионных методах измерения температур поверхности основан на предположении, что ограждающая конструкция рассматривается как неограниченная пластина.

В случае нагревания (охлаждения) конструкции в виде неограниченной пластины при ГУ III рода для определения относительной избыточной температуры можно воспользоваться выражением (1).

Из (1) видно, что относительная температура – функция теплофизических характеристик ограждения, коэффициента теплоотдачи у наружной поверхности и продолжительности измерений, которые входят в критерии  $Fo$  и  $Bi$ .



Для определения термического сопротивления теплопередаче  $R_{\text{ЭК}}$  воспользуемся соотношениями:

$$\lambda_{\text{ЭК}} = \frac{\sum \delta_i}{R_{\text{ЭК}}}; \quad a = \sum \frac{\lambda_{\text{ЭК}}}{c_{\text{ЭК}} \rho}; \quad R_{\text{ЭК}} = \sum \frac{\delta_i}{\lambda_{\text{ЭК}}};$$

$$\text{Bi} = \alpha \frac{\delta_i}{\lambda_{\text{ЭК}}} = \bar{\alpha} R_{\text{ЭК}}; \quad \text{Fo} = \frac{a\tau}{\delta_i^2} = \frac{\tau}{c_{\text{ЭК}} \rho_{\text{ЭК}} \delta_i R_{\text{ЭК}}}.$$

Подставляя приведенные соотношения в (1), получим уравнение, из которого определим сопротивление теплопередаче ограждения:

$$\theta = \frac{t_{(0, \tau_i)} - t_{(0, \tau_0)}}{t_{(\infty, \tau_i)} - t_{(0, \tau_0)}} = \frac{\bar{\alpha} R (1 - \eta)}{\alpha R + 1} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin[v_0 (1 - \eta)] \times$$

$$\times \exp\left(-v^2 \frac{\tau_i}{\delta_i c_{\text{ЭК}} \rho_{\text{ЭК}} R_{\text{ЭК}}}\right), \quad (6)$$

где  $\bar{\alpha}$  – суммарный коэффициент теплоотдачи  $\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_{\text{к}} + \bar{\alpha}_{\text{л}}$ ;  $\bar{\alpha}_{\text{к}}$ ,  $\bar{\alpha}_{\text{л}}$  – расчетные конвективный и радиационный коэффициенты теплоотдачи.

Из (6) следует, что, определив относительную температуру  $\theta$  в любой момент времени, пока тепловой потенциал не достиг противоположной поверхности пластины, по результатам натурных измерений можно найти и термическое сопротивление конструкции.

Для определения сопротивления теплопередаче  $R_{\text{ЭК}} = \sum \frac{\delta_i}{\lambda_{\text{ЭК}}}$  или эффективного коэффициента теплопроводности  $\lambda_{\text{ЭК}}$  вначале задаются ориентировочные расчетные теплофизические характеристики, ориентировочные величины коэффициентов теплоотдачи у наружной поверхности  $\bar{\alpha}_{\text{ЭК}} = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}$  в пределах нормируемых. По этим значениям определяются критерии  $\text{Bi}$  и  $\text{Fo}$  при различных  $\lambda_{\text{ЭК}}$ ,  $c_{\text{ЭК}}$ ,  $\rho_{\text{ЭК}}$  в заданные кратные промежутки времени между  $\tau_0$  и  $\tau_{\text{max}}$ , за которые температурный потенциал не изменит температуру внутренней поверхности ограждения, т. е.  $t_{(x=\delta, \tau_{\text{max}})} \geq t_{(0, \tau_0)}$ .

По полученным расчетным величинам  $\text{Bi}$  и  $\text{Fo}$ , по соотношению (6) или построенным номограммам [9] вычисляются зависимости  $\theta = f(\text{Fo}, \text{Bi})$ , по которым можно опосредованно определить зависимость  $R = f(\theta, \tau)$  в графическом виде при различных  $\bar{\alpha}_{\text{ЭК}}$ .

Затем для определения фактической величины  $R_{\text{ЭК}}$  ограждающей конструкции замеряют в расчетные промежутки времени начальную температуру ограждающей конструкции, текущую температуру ограждающей конструкции в заданный промежуток времени и изменившуюся температуру окружающей среды и, в конечном итоге, рассчитывают  $\theta_j$ .

По разности температур  $t_{(0, \tau_j)}$  и  $t_{(\infty, \tau_j)}$  находят конкретную величину  $\bar{\alpha}$  по известным соотношениям.

Величину  $R_{\text{эк}}$  в зависимости от полученных  $\bar{\alpha}$  и  $\tau_j$  можно определить по графику  $R = f(\theta, \tau)$  в разные промежутки времени, найдя ее среднее значение  $R_{\text{ср}} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_n}{n}$  или используя преобразованное относительно  $R$  соотношение (6).

Все изложенное можно показать на примере.

По выражению (6) построен график зависимости  $\theta = f(\text{Fo}, \text{Bi})$ , по которому можно опосредованно определить зависимость  $R = f(\theta, \tau)$ , подставив различные значения  $\theta$  в определенные промежутки времени.

Например, для  $\alpha = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  при начальных условиях:

$t_0, ^\circ\text{C}$	$\vartheta, ^\circ\text{C}$	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$h, \text{м}$	$c, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$R, \text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$			$\tau, \text{ч}$		
0	-5	5	0,25	0,84	1000	0,6	1,0	1,4	1	2	5

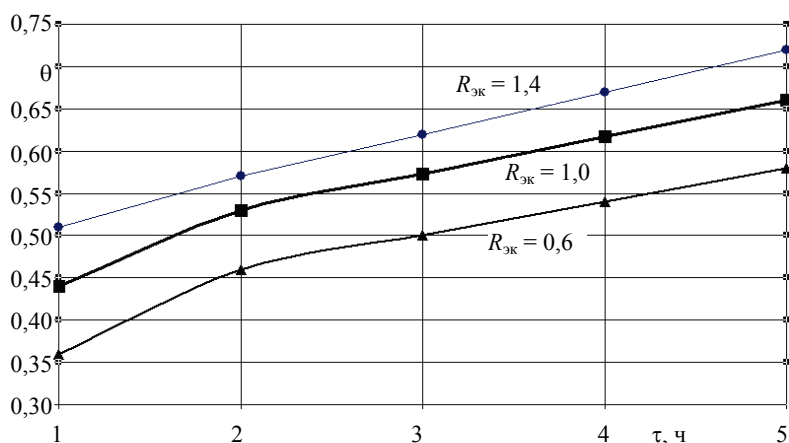
Расчет представлен в табл. 5.

Таблица 5

Результаты расчета  $\theta$  при  $\alpha = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$   
The results of the calculation  $\theta$  when  $\alpha = 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

$R, \text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	0,6			1,0			1,4		
$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,42			0,25			0,18		
$a, \text{м}^2/\text{ч}$	0,0016			0,0010			0,0007		
$\tau, \text{ч}$	1	2	5	1	2	5	1	2	5
Fo	0,026	0,052	0,130	0,016	0,031	0,078	0,011	0,022	0,056
Bi	3,0			5,0			7,0		
$\theta$	0,36	0,46	0,58	0,44	0,53	0,66	0,51	0,57	0,72

По результатам табл. 5 построены зависимости  $R = f(\theta, \tau)$  при  $\alpha = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  (рис. 3).

Рис. 3. Зависимости  $R = f(\theta, \tau)$  при  $\alpha = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ Fig. 3. The dependencies  $R = f(\theta, \tau)$  when  $\alpha = 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Рассмотрим случай при  $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,  $h = 0,25 \text{ м}$  для начальных условий:

$t_0, \text{°C}$	$\vartheta, \text{°C}$	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$h, \text{м}$	$c, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$R, \text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$			$\tau, \text{ч}$		
0	-5	10	0,25	0,84	1000	0,6	1,0	1,4	1	2	5

Расчеты представлены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты расчета  $\theta$  при  $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$   
 The results of the calculation  $\theta$  when  $\alpha = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

$R, \text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	0,6			1,0			1,4		
$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,42			0,25			0,18		
$a, \text{м}^2/\text{ч}$	0,0016			0,0010			0,0007		
$\tau, \text{ч}$	1	2	5	1	2	5	1	2	5
Fo	0,026	0,052	0,130	0,016	0,031	0,078	0,011	0,022	0,056
Bi	6,0			10,0			14,0		
$\theta$	0,55	0,66	0,77	0,64	0,72	0,82	0,69	0,76	0,84

По результатам табл. 6 построены зависимости  $R = f(\theta, \tau)$  при  $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  (рис. 4).

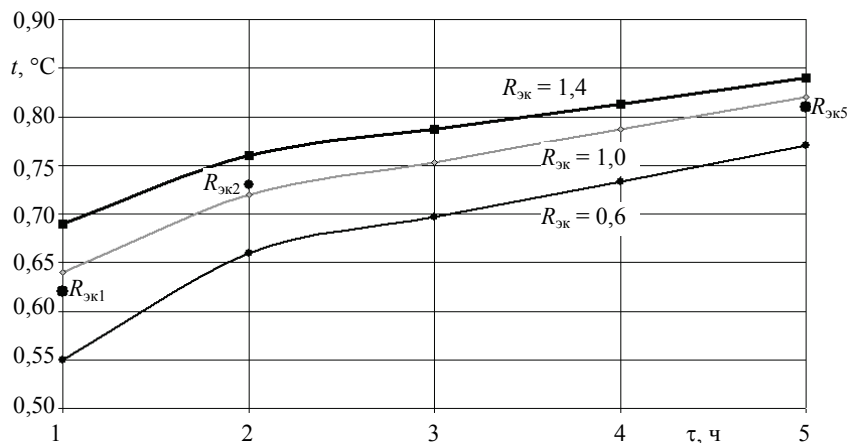


Рис. 4. Зависимости  $R = f(\theta, \tau)$  при  $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

Fig. 4. The dependencies  $R = f(\theta, \tau)$  when  $\alpha = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Определение сопротивления теплопередаче по графическим зависимостям, построенным на основании расчетных величин (рис. 3 и 4) с использованием (1) и (6), по которым в [9] построены номограммы для определения опосредованно  $R = f(\theta, \tau)$ , производится следующим образом.

В процессе исследований были определены температуры в разные промежутки времени (табл. 7).

Таблица 7

Время $\tau$ , ч	$t_{(0,\tau_0)}$ , °C	$t_{(\infty,\tau_j)}$ , °C	$t_{(0,\tau_j)}$ , °C	$t_{(x=\delta,\tau_j)}$ , °C	$\theta$	$R_{эк,j}$ , м <sup>2</sup> ·К/Вт
1	-5,0	-10,0	-8,10	-5,0	0,62	0,90
2	-5,0	-10,0	-8,56	-5,0	0,73	1,11
5	-5,0	-10,0	-9,05	-5,1	0,81	0,93

По рис. 4 получены значения  $R_{эк1} = 0,90$ ;  $R_{эк2} = 1,11$ ;  $R_{эк5} = 0,93$ .

Средняя из измеренных величин  $R_{эк,ср} = \frac{0,90 + 1,11 + 0,93}{3} = 0,98$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)

определяет искомое сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции. При этом время окончания измерений составило 5 ч, когда  $t_{(x=\delta,\tau_{\max})} \geq t_{(0,\tau_0)}$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что расчетные соотношения адекватны проведенным натурным измерениям, а построенными по ним графиками можно пользоваться для контроля сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, если выбрать наиболее усредненную по характеристикам зону измерений, т. е. участков с однородным температурным полем, и период времени температурной истории, где задача может решаться с заданной точностью при сокращении количества измерений.

Из вышеуказанного следует, что на основании проведенных аналитических и теоретических исследований можно предложить новые методику и способ определения теплофизических характеристик, в том числе и  $R$ .

## ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований разработаны методика и способ определения теплофизических характеристик, в основу которых положено решение нестационарной задачи теплопроводности, устанавливающее связь между временными и пространственными изменениями температуры под воздействием источника (стока) теплоты.

2. Разработанные методика и способ позволяют определить сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции при нестационарном режиме в натуральных условиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Руденко, Н. Н. Влияние массивности на максимальный тепловой поток / Н. Н. Руденко, И. Н. Волошановская // Строительство-2001: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2001. С. 84–87.
2. Об утверждении требований к энергетическому паспорту, составленному по результатам обязательного энергетического обследования, и энергетическому паспорту, составленному на основании проектной документации и правил направления копий энергетического паспорта, составленного по результатам обязательного энергетического обследования: Министерство энергетики Российской Федерации, приказ от 19.04.2010 № 182.
3. Фурсова, И. Н. Алгоритм исследования плотности теплового потока через ограждение при нестационарных тепловых условиях / И. Н. Фурсова, А. А. Капралов // Строительство-2013: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Ростов н/Д: РГСУ, 2013. С. 87–88.

4. Тепло- и массообмен: в 2 ч. / Б. М. Хрусталеv [и др.]. Минск: Беларус. нац. техн. ун-т, 2007. Ч. 1. 606 с.
5. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К. Ф. Фокин, под ред. Ю. А. Табунщикова, В. Г. Гагарина. 5-е изд., испр. и пересмотр. М.: АВОК-Пресс, 2006. 256 с.
6. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. М.: Высш. шк., 1967. 600 с.
7. Био, М. А. Вариационные принципы в теории теплообмена / М. А. Био. М.: Энергия, 1975. 209 с.
8. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А. Г. Шашков [и др.]; под ред. А. В. Лыкова. М.: Энергия, 1973. 336 с.
9. Пехович, А. И. Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. Л.: Энергия, 1968. 304 с.
10. К вопросу диагностики сопротивлений теплопроводности наружных ограждающих конструкций зданий / Б. М. Хрусталеv [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2010. № 4. С. 36–43.

Поступила 27.06.2017 Подписана в печать 25.08.2017 Опубликовано онлайн 29.01.2018

#### REFERENCES

1. Rudenko N. N., Voloshanovskaya I. N. (2001) The Effects of Massiveness on the Maximum Heat Flux. *Stroitel'stvo-2001: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Construction-2001: Materials of the International Scientific-and-Practical Conference]. Rostov-on-Don, Rostov State University of Civil Engineering, 84–87 (in Russian).
2. On Approval of Requirements for Energy Passport, Based on the Results of Mandatory Energy Audit and Energy Passport, Compiled on the Basis of Project Documentation and Rules for Sending Copies of the Energy Passports Compiled in Accordance with the Results of Mandatory Energy Audit. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation, 19.04.2010, No 182. *Electronic Fund of Legal Normative and Technical Documentation*. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902220954> (Accessed: 4 September 2017) (in Russian).
3. Fursova I. N., Kapralov A. A. (2013) The Algorithm to Examine the Density of the Heat Flux through the Fence under Non-Stationary Thermal Conditions. *Stroitel'stvo-2013: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Construction-2013: Materials of the International Scientific-and-Practical Conference]. Rostov-on-Don, Rostov State University of Civil Engineering, 87–88 (in Russian).
4. Khroustalev B. M., Nesenchuk A. P., Timoshpol'skii V. I., Akel'ev V. D., Sednin V. A., Kopko V. M., Nerez'ko A. V. (2007) *Heat and Mass Exchange. Part 1*. Minsk: Belarusian National Technical University. 606 (in Russian).
5. Fokin K. F., Tabunshchikov Yu. A., Gagarin V. G. (eds.) (2006) *Construction Heat Engineering of Enclosing Parts of Buildings*. 5<sup>th</sup> ed. Moscow, AVOK-Press. 256 (in Russian).
6. Lykov A. V. (1967) *Theory of Thermal Conductivity*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 600 (in Russian).
7. Bio M. A. (1975) *Variational Principles in the Theory of Heat Transfer*. Moscow. Energiya Publ. 209 (in Russian).
8. Shashkov A. G., Volokhov G. M., Abramenko T. N., Kozlov V. P., Lykov A. V. (ed.) (1973) *Methods of Determination of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity*. Moscow. Energiya Publ. 336 (in Russian).
9. Pekhovich A. I., Zhidkikh V. M. (1968) *Calculations of the Thermal Regime of Solids*. Leningrad, Energiya Publ. 304 (in Russian).
10. Khroustalev B. M., Akeliev V. D., Sizov V. D., Zolotoreva I. M. (2010) Towards Diagnostics of Heat Conductivity Resistance of Building Exterior/Outside Fencing Constructions. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 36–43 (in Russian).

Received: 27 June 2017

Accepted: 25 August 2017

Published online: 29 January 2018