

**РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛОПЕРЕНОС  
ЧЕРЕЗ МИНЕРАЛОВАТНЫЕ ИЗДЕЛИЯ  
РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ**

**RADIATION HEAT TRANSFER  
THROUGH THE MINERAL WOOL PRODUCTS  
WITH DIFFERENT DENSITY AT CHANGE OF TEMPERATURE**

*И.Я. КИСЕЛЁВ*  
*I.YA. KISELYOV*

(Научно-исследовательский институт строительной физики  
Российской академии архитектуры и строительных наук)  
(Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences)  
E-mail: ikiselyov@bk.ru

*Тепловой поток через минераловатные изделия представляет собой сумму четырех слагаемых: кондукционного потока через газ в порах материала, кондукционного потока через его матрицу, радиационного потока через газ в порах и конвекционного потока через газ в порах. Расчеты показывают, что доля радиационного потока в общем тепловом потоке: существенна только при малых плотностях материала и уменьшается с увеличением его плотности; увеличивается с увеличением температуры, но даже при температуре +25°C она существенна только при малых плотностях материала.*

*Heat flow through the mineral wool products is the sum of four summands: the conductive flow through the gas in the pores of material, conductive flow through its matrix, radiation flow through the gas in the pores and the convection flow through the gas in the pores. Calculations show that the portion of radiation flow in the general heat flow: it is essential only at the low density of material and decreases with an increase of its density; it increases with an increase of the temperature, but even at +25°C it is essential only at the low densities of material.*

**Ключевые слова:** минераловатные изделия, радиационный теплоперенос, диапазон плотности от 25 до 150 кг/м<sup>3</sup>, диапазон температуры от –20 до +25°C.

**Keywords:** mineral wool products, radiation heat transfer, density range from 25 to 150 kg/m<sup>3</sup>, temperature range from –20 to +25°C.

Теплопроводность теплоизоляционных материалов, применяемых в наружных ограждающих конструкциях зданий, является одной из важнейших их характеристик, так как именно она в значительной мере определяет ход процесса теплопереноса через наружные конструкции и, как следствие, теплоизоляционные свойства этих конструкций [1...4].

Тепловой поток через минераловатные изделия представляет собой сумму: кондукционного потока через газ в порах, кондукционного потока через матрицу материала и радиационного теплового потока. На основе этой модели с учетом того, что в общем случае также имеет место конвекционный теплоперенос через газ в порах матери-

ала в [5] получена зависимость, описываю-

щая теплопроводность волокнистого материала:

$$\lambda \left( \gamma_o, \gamma_g, \gamma_s, D_1, \Theta, \nabla(\Theta + 273,15), \alpha_g, \eta_g, f_{\Theta g}, f_{\Theta s}, \lambda_{g25}, \lambda_{s25}, c_p, p, d \right) =$$

$$= \lambda_{cdg} + \lambda_{cds} + \lambda_r + \lambda_{cv} = \frac{\frac{\pi \gamma_s}{4 \gamma_o} D_1}{\frac{\pi \gamma_s}{4 \gamma_o} D_1 + \frac{RT}{\pi \sqrt{2} d^2 p N_A}} \lambda_{g25} [1 + f_{\Theta g} (\Theta - 25)] +$$

$$+ K_B \lambda_{s25} [1 + f_{\Theta s} (\Theta - 25)] \frac{\gamma_o}{\gamma_s} + K_C \sigma_r D_1 (\Theta + 273,15)^3 \frac{\gamma_s}{\gamma_o} +$$

$$+ 1,91 \cdot 10^{-4} \frac{\pi^4 \alpha_g [\gamma_g (\Theta + 273,15)]^2 g \nabla(\Theta + 273,15) c_p (\Theta + 273,15) D_1^4 \gamma_s^4}{[\eta_g (\Theta + 273,15)] \gamma_o^4}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность минераловатного изделия, Вт/(м<sup>о</sup>·С);  $\lambda_{cdg}$  – кондукционная составляющая теплопроводности изделия, значение которой определяется теплопроводностью газа в порах, Вт/(м<sup>о</sup>·С);  $\lambda_{cds}$  – кондукционная составляющая теплопроводности изделия, значение которой определяется теплопроводностью его матрицы, Вт/(м<sup>о</sup>·С);  $\lambda_r$  – радиационная составляющая теплопроводности изделия, Вт/(м<sup>о</sup>·С);  $\lambda_{cv}$  – конвекционная составляющая теплопроводности газа в порах, Вт/(м<sup>о</sup>·С);  $\gamma_o$  – плотность изделия, кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_s$  – плотность матрицы изделия, кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_g$  – плотность газа в порах, кг/м<sup>3</sup>;  $f_{\Theta g}$  и  $f_{\Theta s}$  – температурные коэффициенты теплопроводности газа и матрицы, 1/°С;  $D_1$  – диаметр волокон, м;  $\Theta$  – температура, °С;  $\nabla(\Theta + 273,15)$  – градиент температуры, К/м;  $\lambda_{g25}$  и  $\lambda_{s25}$  – теплопроводность газа и матрицы при температуре +25°С, Вт/(м<sup>о</sup>·С);  $p$  – давление газа в порах, Па;  $d$  – диаметр молекулы газа, м;  $c_p$  – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг<sup>о</sup>·С);  $\alpha_g$  – температурный коэффициент объемного расширения газа, К<sup>-1</sup>;  $\eta_g$  – вязкость газа, Па·с;  $K_B$  и  $K_C$  – безразмерные эмпирические константы;  $g = 9,807$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;  $R = 8,314 \cdot 10^3$  Дж/(кмоль·К) – универсальная газовая постоянная;  $N_A = 6,023 \cdot 10^{26}$  кмоль<sup>-1</sup> – число Авогадро;  $\sigma_r = 5,670 \cdot 10^{-8}$

Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана.

Необходимые для проведения расчетов теплопроводности  $\lambda$  по формуле (1) значения плотности  $\gamma_g$ , теплопроводности  $\lambda_{g25}$ , температурного коэффициента  $f_{\Theta g}$  теплопроводности, диаметра  $d$  молекул, температурного коэффициента  $\alpha_g$  объемного расширения и вязкости  $\eta_g$  воздуха в порах материалов, а также значения плотности  $\gamma_s$ , теплопроводности  $\lambda_{s25}$ , температурного коэффициента  $f_{\Theta s}$  теплопроводности матрицы материалов (базальта, габбро-диабазы и т.д.) приведены в справочной литературе.

Значения коэффициентов  $K_B$  и  $K_C$  исследованных минераловатных изделий были определены методом регрессивного анализа результатов измерения их теплопроводности. Так, например, для изделий из базальтового волокна  $K_B = 0,0417$ ,  $K_C = 14,0$ , для изделий из габбро-диабазового волокна  $K_B = 0,0594$ ,  $K_C = 14,0$ .

Четвертое слагаемое в правой части формулы (1) равняется конвекционной  $\lambda_{cv}$  составляющей теплопроводности газа в порах минераловатных изделий. Выполненные расчеты показывают, что для волокнистых теплоизоляционных материалов доля конвекционной составляющей в общем тепловом потоке через эти материалы пренебрежимо мала: для материалов малой плотности она составляет  $(2...3) \cdot 10^{-3} \%$ , а

для материалов большой плотности –  $(2...5) \cdot 10^{-5}\%$ . Следовательно, при расчете теплопроводности  $\lambda$  этих материалов можно пренебречь ее конвекционной  $\lambda_{cv}$  составляющей.

Рассмотрим подробнее радиационный теплоперенос через минераловатные изде-

лия. Табл. 1 – зависимость теплопроводности  $\lambda$ , ее радиационной  $\lambda_r$  составляющих и доли  $\zeta_r$  радиационного теплового потока в общем тепловом потоке через минераловатные изделия от плотности  $\gamma_0$  и температуры  $\Theta$ .

Таблица 1

Температура $\Theta, ^\circ\text{C}$	Характеристика	Теплопроводность $\lambda$ , ее радиационная составляющая $\lambda_r, 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ и доля радиационного теплового потока $\zeta_r, \%$ , при плотности $\gamma_0, \text{ кг}/\text{м}^3$								
		25	35	40	50	60	75,3	100	125	150
-20	$\lambda_r, 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	7,21	5,15	4,51	3,61	3,01	2,39	1,80	1,44	1,20
	$\lambda, 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	31,1	29,5	29,1	28,7	28,6	28,7	29,4	30,3	31,3
	$\zeta_r, \%$	23	18	16	13	11	8,3	6,1	4,8	3,8
-10	$\lambda_r, 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	8,10	5,79	5,06	4,10	3,38	2,69	2,03	1,62	1,35
	$\lambda, 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	32,8	30,9	30,5	30,0	29,8	29,9	30,4	31,3	32,3
	$\zeta_r, \%$	25	19	17	14	11	9,0	6,7	5,2	4,2
0	$\lambda_r, 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	9,06	6,47	5,66	4,53	3,78	3,01	2,27	1,81	1,51
	$\lambda, 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	34,4	32,4	31,8	31,2	30,9	30,9	31,4	32,3	33,2
	$\zeta_r, \%$	26	20	18	15	12	9,7	7,2	5,6	4,6
+10	$\lambda_r, 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	10,1	7,21	6,31	5,05	4,21	3,35	2,52	2,02	1,68
	$\lambda, 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	36,3	33,9	33,3	32,5	32,2	32,1	32,5	33,3	34,3
	$\zeta_r, \%$	28	21	19	16	13	10	7,8	6,1	4,9
+25	$\lambda_r, 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	11,8	8,42	7,36	5,89	4,91	3,91	2,95	2,36	1,94
	$\lambda, 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	39,2	36,3	35,5	34,6	34,1	33,9	34,2	35,0	35,9
	$\zeta_r, \%$	30	23	21	17	14	12	8,6	6,7	5,5

В табл. 1 приведены результаты расчета зависимости от плотности минераловатных изделий доли  $\zeta_r$  радиационного потока в общем тепловом потоке через изделия из габбро-диабазы с диаметром  $D_1$  волокон, характерным для этих изделий и равным 5 мкм для пяти значений температуры: -20, -10, 0, +10 и +25 $^\circ\text{C}$ . Значение доли  $\zeta_r$  равно:

$$\zeta_r = \frac{q_r}{q_\Sigma} = \frac{\lambda_r}{\lambda}, \quad (2)$$

где  $q_r$  – плотность радиационного теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $q_\Sigma$  – плотность суммарного теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

Расчеты выполнены по формулам (1) и (2).

Из данных табл. 1 следует:

– зависимость теплопроводности минераловатных изделий от температуры практически линейна и уменьшается с увеличением плотности изделий;

– доля радиационного потока  $\zeta_r$  в общем тепловом потоке существенна только при малых плотностях материала и уменьша-

ется с увеличением его плотности, наиболее быстро доля  $\zeta_r$  уменьшается при малых значениях плотности материала;

– доля радиационного потока  $\zeta_r$  в общем тепловом потоке увеличивается с увеличением температуры, но даже при температуре +25 $^\circ\text{C}$  она существенна только при малых плотностях материала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гагарин В.Г., Пастушков П.П. Количественная оценка энергоэффективности энергосберегающих мероприятий // Строительные материалы. – 2013, № 3. С. 7...9.
2. Гагарин В.Г., Пастушков П.П., Реутова Н.А. К вопросу о назначении расчетной влажности строительных материалов по изотерме сорбции // Строительство и реконструкция. – 2015, № 4 (60). С.152...155.
3. Умнякова Н.П., Бутовский И.Н., Чеботарев А.Г. Развитие методов нормирования теплозащиты энергоэффективных зданий // Жилищное строительство. – 2014, № 7. С. 19...21.
4. Пастушков П.П., Павленко Н.В., Коркина Е.В. Использование расчетного определения эксплуатационной влажности теплоизоляционных материалов // Строительство и реконструкция. – 2015, № 4 (60). С. 168...172.

5. Киселёв И.Я. Влияние зависимости теплопроводности строительных материалов от температуры на сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций зданий // Вестник Волгоградского гос. архитектур.-строит. ун-та. Строительные науки.– 2013, Вып. 31 (50), ч. 2. С. 42...45.

#### REFERENCES

1. Gagarin V.G., Pastushkov P.P. Kolichestvennaja ocenka jenergojeffektivnosti jenergosberegajushhih meroprijatij // Stroitel'nye materialy. – 2013, № 3. S.7...9.

2. Gagarin V.G., Pastushkov P.P., Reutova N.A. K voprosu o naznachenii raschetnoj vlazhnosti stroitel'nyh materialov po izoterme sorbcii // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – 2015, № 4 (60). S. 152...155.

3. Umnjakova N.P., Butovskij I.N., Chebotarev A.G. Razvitie metodov normirovanija teplozashhity

jenergojeffektivnyh zdaniy // Zhilishhnoe stroitel'stvo. – 2014, № 7. S. 19...21.

4. Pastushkov P.P., Pavlenko N.V., Korkina E.V. Ispol'zovanie raschetnogo opredelenija jekspluatacionnoj vlazhnosti teploizoljacionnyh materialov // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – 2015, № 4 (60). S.168...172.

5. Kisel'jov I.Ja. Vlijanie zavisimosti teploprovodnosti stroitel'nyh materialov ot temperatury na soprotivlenie teploperedache ograzhdajushhih konstrukcij zdaniy // Vestnik Volgogradskogo gos. arhitekt.-stroit. un-ta. Stroitel'nye nauki.– 2013, Vyp. 31 (50), ch. 2. S. 42...45.

Рекомендована Ученым советом НИИСФ РААСН. Поступила 31.03.17.