

**ОПИСАНИЕ  
ИЗОБРЕТЕНИЯ  
К ПАТЕНТУ**  
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **16191**

(13) **С1**

(46) **2012.08.30**

(51) МПК

**G 01N 25/18** (2006.01)

(54) **СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ  
ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ**

(21) Номер заявки: а 20100721

(22) 2010.05.12

(43) 2011.12.30

(71) Заявитель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(72) Авторы: Хрусталеv Борис Михайлович; Сизов Валерий Дмитриевич; Акельев Валерий Дмитриевич; Золотарева Ирина Михайловна (ВУ)

(73) Патентообладатель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(56) ВУ 8012 С1, 2006.

ВУ 6125 U, 2010.

RU 2002127867 А, 2004.

RU 2005126461 А, 2007.

RU 2321845 С2, 2008.

SU 866462 А1, 1981.

US 4372691 А, 1983.

(57)

Способ определения сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, при котором измеряют температуру внешней поверхности ограждающей конструкции  $t_{(0,\tau_0)}$  в начальный момент времени  $\tau_0$ , температуры внешней поверхности ограждающей конструкции  $t_{(0,\tau_j)}$  и наружного воздуха  $t_{(\infty,\tau_j)}$  в различные моменты времени  $\tau_j$ , где  $j$  принимает значение от 1 до 4, причем  $\tau_4 - \tau_0 \leq 6$  часов, определяют суммарные коэффициенты теплоотдачи у внешней поверхности ограждающей конструкции  $\bar{\alpha}_j$  для моментов времени  $\tau_j$ , среднюю массовую изобарную теплоемкость  $C_{\text{ЭК}}$  и среднюю плотность  $\rho_{\text{ЭК}}$  слоев ограждающей конструкции, а затем определяют сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции  $R_{\text{ЭК}j}$  в любой из моментов времени  $\tau_j$  из выражения:

$$\frac{t_{(0,\tau_j)} - t_{(0,\tau_0)}}{t_{(\infty,\tau_j)} - t_{(0,\tau_0)}} = 1 - \exp\left(\frac{\bar{\alpha}_j^2 \cdot R_{\text{ЭК}j} \cdot \tau_j}{\sum \delta_i \cdot C_{\text{ЭК}} \cdot \rho_{\text{ЭК}}}\right) \cdot \left[1 - \operatorname{erf}\left(\bar{\alpha}_j \sqrt{\frac{R_{\text{ЭК}j} \cdot \tau_j}{\sum \delta_i \cdot C_{\text{ЭК}} \cdot \rho_{\text{ЭК}}}}\right)\right],$$

где  $\sum \delta_i$  - толщина слоев ограждающей конструкции.

Изобретение относится к строительству и может быть использовано для измерительного контроля зданий и сооружений на соответствие сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций нормативным требованиям.

Известен способ определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций [1], включающий определение средних температур внутренней поверхности ограждения, внутреннего и наружного воздуха и расчет с использованием соотношения:

$$R_{\text{ОВ}} = \frac{t_{\text{в.ср.}} - t_{\text{н.ср.}}}{\tau_{\text{в.ср.}} - \tau_{\text{н.ср.}}} \cdot \frac{1}{\infty_{\text{в}}}, \quad (1)$$

где  $R_{\text{ОВ}}$  - сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции,  $\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ;

**ВУ 16191 С1 2012.08.30**

$t_{в.ср.}, t_{н.ср.}, \tau_{в.ср.}, \tau_{н.ср.}$  - соответственно средние температуры внутреннего воздуха, наружной и внутренней поверхностей, °С;

$\alpha_{в.}$  - коэффициент теплоотдачи у внутренней поверхности.

Недостатками данного способа являются большая продолжительность измерений, сложность в определении коэффициента теплоотдачи у внутренней поверхности и большая трудоемкость при измерениях.

Известен способ определения сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции [2], прототип, при котором замеряют температуры внутренней поверхности ограждения и внутреннего воздуха для моментов времени  $\tau_1, \tau_2$  и  $\tau_3$ , а температуру наружного воздуха замеряют для моментов времени  $\tau_1', \tau_2'$  и  $\tau_3'$ , причем  $\tau_i' = \tau_i + \Delta\tau_n$ , где  $\Delta\tau_n$  - промежуток времени, необходимый для перемещения на улицу, то есть промежуток времени между измерениями температуры внутреннего воздуха, а также поверхности ограждения и соответствующим  $i$ -м измерением наружного воздуха, при этом  $\tau_3 - \tau_1 \geq 7$  час.

$$\tau_2 = (0,9 \dots 1,1) \frac{\tau_1 + \tau_3}{2}, \quad (2)$$

а среднее значение температуры внутренней поверхности ограждения определяют по сдвигу фазы и амплитуде колебаний температур внутренней поверхности, среднее значение температуры наружного воздуха определяют по сдвигу фазы и амплитуде колебаний температур наружного воздуха, а среднее значение температуры внутреннего воздуха принимают соответствующим среднему значению температуры внутренней поверхности ограждения.

Недостатками данного способа являются длительность проведения исследований и аналитических расчетов сдвигов по фазе температур и амплитуд их колебаний, необходимость перемещений для проведения измерений температур внутреннего и наружного воздуха через определенные промежутки времени, внесение дополнительной погрешности при определении средних температур наружного воздуха, внутреннего воздуха и внутренней поверхности, применение в расчетах величины коэффициента теплоотдачи у внутренней поверхности, которая составляет не более 10 %, рассмотрение наружного ограждения как неограниченной пластины при теплотехнических расчетах.

Задача, решаемая изобретением, заключается в значительном сокращении продолжительности измерений и повышении достоверности полученных величин термического сопротивления на основании натуральных измерений.

Поставленная задача решается тем, что измеряют температуру внешней поверхности ограждающей конструкции  $t_{(0, \tau_0)}$  в начальный момент времени  $t_0$ , температуры внешней поверхности ограждающей конструкции  $t_{(0, \tau_j)}$  и наружного воздуха  $t_{(\infty, \tau_j)}$  в различные моменты времени  $\tau_j$ , где  $j$  принимает значение от 1 до 4, причем  $\tau_4 - \tau_0 \leq 6$  часов, определяют суммарные коэффициенты теплоотдачи у внешней поверхности ограждающей конструкции  $\overline{\alpha}_j$  для моментов времени  $\tau_j$ , среднюю массовую изобарную теплоемкость  $C_{эк}$  и среднюю плотность  $\rho_{эк}$  слоев ограждающей конструкции, а затем определяют сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции  $R_{экj}$  в любой из моментов времени  $\tau_j$  из выражения:

$$\frac{t_{(0, \tau_j)} - t_{(0, \tau_0)}}{t_{(\infty, \tau_j)} - t_{(0, \tau_0)}} = 1 - \exp\left(\frac{\overline{\alpha}_j^2 \cdot R_{экj} \cdot \tau_j}{\sum \delta_i \cdot C_{эк} \cdot \rho_{эк}}\right) \cdot \left[1 - \operatorname{erf}\left(\overline{\alpha}_j \sqrt{\frac{R_{экj} \cdot \tau_j}{\sum \delta_i \cdot C_{эк} \cdot \rho_{эк}}}\right)\right],$$

где  $\sum \delta_i$  - толщина слоев ограждающей конструкции.

Способ определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций при контактных и бесконтактных методах измерения температурных полей основан на следующих предпосылках:

а) температуры массопотоков в отапливаемых помещениях с течением времени изменяются интенсивнее по сравнению с температурами внутренних поверхностей;

б) диапазон колебаний температур наружных поверхностей ограждений вследствие флюктуации ветра, температур рассеянных и прямых радиационных потоков - величина переменная, а теплообмен между поверхностью и окружающим воздухом происходит по закону Ньютона-Рихмана;

в) наружное ограждение рассматривается как полуограниченное тело при граничных условиях III рода.

Замена условий однозначности для неограниченной пластины, которые обычно используются при теплотехнических расчетах наружных ограждений, основана на принципе эквивалентности, когда при реконструкции геометрических характеристик системы не происходит изменения температур. Если источники теплоты на той или иной границе системы или внутри них за определенный интервал времени не оказывают существенного влияния на рассчитываемую температуру точки или области систем, то источники теплоты и некоторые части в ней могут быть исключены из рассмотрения.

Эти границы, в отличие от других границ, активно влияющих на тепловое состояние, рассматриваются как "пассивные".

Граница рассматривается как "пассивная", если температуры и градиент температуры на ее поверхности за расчетный интервал времени неизменны. Если в неограниченной пластине за расчетный интервал времени тепловые условия на одной из поверхностей равны начальным, то пластина может рассматриваться как полуограниченное тело. Следовательно, при обследованиях, например тепловизионных, когда продолжительность измерений температурных полей любого из фрагментов внешних ограждений с термическим сопротивлением теплопередаче  $R_0 = 1 \div 2,5 \text{ м}^2 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$  не превышает 6 часов, то этот фрагмент можно рассматривать как полуограниченное тело.

Из граничных условий наиболее корректными для данной задачи являются граничные условия III рода, когда известна температура наружного воздуха у поверхности ограждения и закон теплообмена между ним и поверхностью:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \infty (t_{0,2} - t_{\infty,2}),$$

где  $t_{\infty,2}$  - температура наружного воздуха,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_{0,2}$  - температура поверхности,  $^\circ\text{C}$ ;

$\infty$  - коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт/м}^2 \text{ К}$ .

Для полуограниченного тела при граничных условиях III рода относительная избыточная температура  $\theta$  является функцией теплофизических характеристик ограждения, продолжительности измерений и коэффициента теплоотдачи у внешней поверхности:

$$\theta = \frac{t_{(0,\tau)} - t_{(0,0)}}{t_{(\infty,2)} - t_{(0,0)}} = 1 - \exp\left(\frac{\infty^2}{\lambda_{\text{эк}}^2} \cdot a_{\text{эк}} \cdot \tau\right) \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{\infty}{\lambda_{\text{эк}}} \sqrt{a_{\text{эк}} \cdot \tau}\right)\right], \quad (3)$$

$t_{(0,\tau)}$  - температура внешней поверхности ограждения в момент времени  $\tau$  измерений (1, 2, 3...6 ч и т.д.),  $^\circ\text{C}$ ;

$t_{(0,0)}$  - температура внешней поверхности ограждения в начальный момент времени,  $\tau = 0$ ,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_{(\infty,2)}$  - средняя температура наружного воздуха за время измерений,  $^\circ\text{C}$ ;

$\infty$  - среднее значение коэффициента теплопередачи у внешней поверхности,  $\text{Вт/м}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

$\lambda_{\text{эк}}$ ,  $a_{\text{эк}}$  - эквивалентные коэффициенты теплопроводности и температуропроводности.

Для определения термического сопротивления теплопроводности  $R_{\text{эк}}$  воспользуемся следующими соотношениями:

$$\lambda_{\text{эк}} = \frac{\sum \delta_i}{R_{\text{эк}}}; \quad \alpha_{\text{эк}} = \sum \frac{\lambda_{\text{эк}}}{C_{\text{эк}} \rho_{\text{эк}}}; \quad R_{\text{эк}} = \sum \frac{\delta_i}{\lambda_{\text{эк}}}, \quad (4)$$

где  $R_{\text{эк}}$  - эквивалентное сопротивление теплопередаче ограждения,  $\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C /Вт}$ ;

# ВУ 16191 С1 2012.08.30

$\sum \delta_i$  - толщина слоев ограждения, м;

$C_{эк}$  - массовая удельная теплоемкость слоев ограждения, Дж/кг ч;

$\rho_{эк}$  - плотность слоев ограждения, кг/м<sup>3</sup>.

Подставляя приведенные соотношения, получим уравнение для определения сопротивления теплопередаче ограждения в виде:

$$\frac{t_{(0,\tau)} - t_{(0,0)}}{t_{(\infty,2)} - t_{(0,0)}} = 1 - \exp\left(\frac{\overline{\alpha}^2 \cdot R_{эк} \cdot \tau}{\sum \delta_i \cdot C_{эк} \cdot \rho_{эк}}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-R_{эк} \cdot \tau}{\sqrt{\sum \delta_i \cdot C_{эк} \cdot \rho_{эк}}}\right)\right], \quad (5)$$

В выражении (5)  $\overline{\alpha}$  - суммарный коэффициент теплоотдачи, который равен:

$$\overline{\alpha} = \alpha_k + \alpha_l, \quad (6)$$

$\alpha_k, \alpha_l$  - конвективный и радиационный коэффициенты теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup> °С.

$\alpha_k$  определяется из расчетных зависимостей для конвективного теплообмена у вертикально расположенных пластин в зависимости от температур наружных поверхностей и наружного воздуха, скорости ветра, расстояния поверхностей от уровня земли.

$\alpha_l$  зависит от температур поверхностей анализируемого фрагмента, поверхности земли у основания здания, небосвода, угловых коэффициентов, радиационных характеристик.

Таким образом, по результатам натурных измерений температур поверхностей наружных ограждений, воздуха у внешней поверхности, времени измерений, определенных коэффициентов конвективной и лучистой теплоотдачи, толщин ограждений, величин массовой удельной теплоемкости и плотности ограждений можно определить сопротивление теплопередаче ограждения.

В результате проведенных замеров температур внешней поверхности ограждения, наружного воздуха в течение четырех часов получены значения исходных данных и величины коэффициентов теплоотдачи, рассчитанные по известным соотношениям.

№ изм.	Время измерений, $\tau$ сек	$t_{(0,0)}$ , °С	$t_{(0,\tau)}$ , °С	$t_{(\infty,\tau)}$ , °С	$\overline{\alpha}$ , Вт/м <sup>2</sup> °С
1.	3600	-1,8	-3,8	-4,8	10,0
2.	7200	-1,8	-3,6	-4,25	9,0
3.	10800	-1,8	-3,5	-3,9	11,0
4.	14400	-1,8	-3,5	-3,9	11,0

Необходимо определить термическое сопротивление теплопередаче наружного ограждения толщиной  $\delta = 0,27$  м, исходя из следующих начальных данных. Средняя (эквивалентная) массовая изобарная теплоемкость ограждения  $C = 1023$  Дж/кг К, средняя (эквивалентная) плотность слоев ограждения  $\rho = 1683$  кг/м<sup>3</sup>.

Для определения термического сопротивления воспользуемся уравнением (5) и методом последовательных приближений добиваемся равенства левой и правой частей:

1. при  $\tau = 3600$  сек:

1.1.  $R = 3,0 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$

$$\frac{-3,8 + 1,8}{-4,8 + 1,8} = 1 - \exp\left(\frac{10^2 \cdot 3,0 \cdot 3600}{0,27 \cdot 1023 \cdot 1683}\right) \left[1 - \operatorname{erf}\left(10 \sqrt{\frac{3 \cdot 3600}{0,27 \cdot 1023 \cdot 1683}}\right)\right] =$$

$$= 1 - \exp(2,32) [1 - \operatorname{erf}(1,5235)] = 1 - 10,187 [1 - 0,96875] = 0,681$$

$0,667 \neq 0,681;$

1.2.  $R = 2,0 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$

$$0,667 = 1 - \exp(1,547) [1 - \operatorname{erf}(1,244)] = 0,6309$$

$0,667 \neq 0,6309;$

# BY 16191 C1 2012.08.30

$$1.3. R = 2,5 \frac{M^2 \cdot K}{B_T}$$

$$0,667 = 1 - \exp(1,936)[1 - \operatorname{erf}(1,391)] = 0,65987$$
$$0,667 \neq 0,65987;$$

$$1.4. R = 2,68 \frac{M^2 \cdot K}{B_T}$$

$$0,667 = 1 - \exp(2,075)[1 - \operatorname{erf}(1,440)] = 0,668$$
$$0,667 \approx 0,668;$$

2. при  $\tau = 7200$  сек:

$$2.1. R = 3,0 \frac{M^2 \cdot K}{B_T}$$

$$\frac{-3,6+1,8}{-4,25+1,8} = 1 - \exp\left(\frac{9^2 \cdot 3,0 \cdot 7200}{0,27 \cdot 1023 \cdot 1683}\right) \left[1 - \operatorname{erf}\left(9 \sqrt{\frac{3 \cdot 7200}{0,27 \cdot 1023 \cdot 1683}}\right)\right] =$$
$$= 1 - \exp(3,76)[1 - \operatorname{erf}(1,94)] = 0,739$$
$$0,735 \neq 0,739;$$

$$2.2. R = 2,5 \frac{M^2 \cdot K}{B_T}$$

$$0,735 = 1 - \exp(3,13)[1 - \operatorname{erf}(1,77)] = 0,72$$
$$0,735 \neq 0,72;$$

$$2.3. R = 2,7 \frac{M^2 \cdot K}{B_T}$$

$$0,735 = 1 - \exp(3,387)[1 - \operatorname{erf}(1,840)] = 0,732$$
$$0,735 \approx 0,732;$$

3. при  $\tau = 10800$  сек:

$$3.1. R = 3,0 \frac{M^2 \cdot K}{B_T}$$

$$\frac{-3,5+1,8}{-3,9+1,8} = 1 - \exp\left(\frac{11^2 \cdot 3 \cdot 10800}{0,27 \cdot 1023 \cdot 1683}\right) \left[1 - \operatorname{erf}\left(11 \sqrt{\frac{3 \cdot 10800}{0,27 \cdot 1083 \cdot 1683}}\right)\right] =$$
$$= 1 - \exp(8,4256)[1 - \operatorname{erf}(2,9)] = 0,812$$
$$0,89 \neq 0,812;$$

$$3.2. R = 2,5 \frac{M^2 \cdot K}{B_T}$$

$$0,809 = 1 - \exp(7,02)[1 - \operatorname{erf}(2,65)] = 0,777$$
$$0,809 \neq 0,78;$$

$$3.1. R = 2,69 \frac{M^2 \cdot K}{B_T}$$

$$0,809 = 1 - \exp(7,555)[1 - \operatorname{erf}(2,75)] = 0,806$$
$$0,809 \neq 0,806;$$

4. при  $\tau = 14400$  сек:

$$4.1. R = 3 \frac{M^2 \cdot K}{B_T}$$

# BY 16191 C1 2012.08.30

$$\frac{-3,5+1,8}{-3,9+1,8} = 1 - \exp\left(\frac{11^2 \cdot 3 \cdot 14400}{0,27 \cdot 1023 \cdot 1683}\right) \left[1 - \operatorname{erf}\left(11 \sqrt{\frac{3 \cdot 14400}{0,27 \cdot 1023 \cdot 1683}}\right)\right] =$$
$$= 1 - \exp(11,234) [1 - \operatorname{erf}(3,352)] = 0,974$$

$0,809 \neq 0,974;$

$$4.2. R = 2,5 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$$

$$0,809 = 1 - \exp(9,36117) [1 - \operatorname{erf}(3,06)] = 0,801$$

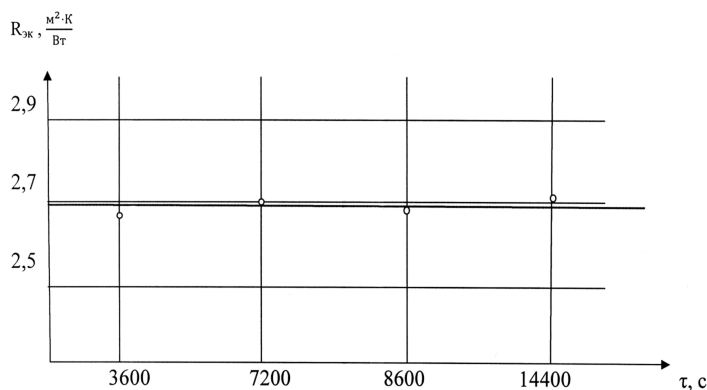
$0,809 \neq 0,801;$

$$4.3. R = 2,71 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$$

$$0,809 = 1 - \exp(10,148) [1 - \operatorname{erf}(3,186)] = 0,8085$$

$0,809 \approx 0,8085.$

По полученным значениям  $R_{\text{ЭК}} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$  в различные интервалы времени можно построить графическую зависимость  $R_{\text{ЭК}} = f(\tau)$ :



Приведенная зависимость показывает, что полученные методом последовательных приближений величины термического сопротивления по выражению (5) не отклоняются от среднего значения  $R = 2,695 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$  в пределах 1-2 %, что показывает адекватность расчетных значений результатам натуральных обследований, и для определения  $R_{\text{ЭК}}$  можно пользоваться уравнением (5), связывающим относительную избыточную температуру, коэффициенты теплоотдачи у внешней поверхности и температуропроводность материалов ограждения для полуограниченного тела при граничных условиях III рода.

Источники информации:

1. ГОСТ 26254-84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. - М.: Изд-во стандартов, 1985. - С. 1-24.
2. Патент BY 8012 C1, МПК G 01K 17/20, опубл. 2006.04.30.