

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **029331**(13) **B1**(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2018.03.30

(51) Int. Cl. **G01N 25/18 (2006.01)**

(21) Номер заявки
201600008

(22) Дата подачи заявки
2015.11.27

(54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

(43) **2017.05.31**(56) **BY-C1-16191**(96) **2015/EA/0149 (BY) 2015.11.27**

ХРУСТАЛЕВ Б.М. и др. К вопросу диагностики сопротивлений теплопроводности наружных ограждающих конструкций зданий. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика, 2010, № 4, с. 36-43

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(BY)**

**RU-C1-2262686
RU-C1-2383008**

(72) Изобретатель:
**Хрусталёв Борис Михайлович, Сизов
Валерий Дмитриевич, Нестеров Лев
Валентинович (BY)**

(57) Изобретение относится к строительству и может быть использовано для измерительной диагностики зданий и сооружений на соответствие сопротивлений теплопередаче ограждающей конструкции нормативным требованиям. Задача, решаемая изобретением, заключается в более точном определении времени прекращения измерений τ_4 , упрощении решения задачи, снижении трудоемкости математических расчетов, сокращении продолжительности измерений, повышении вероятности получения более точного результата. Поставленная задача решается тем, что измеряют температуру внешней поверхности ограждающей конструкции $t_{(0,\tau_0)}$ в начальный период времени τ_0 , температуры внешней поверхности ограждающей конструкции $t_{(0,\tau_j)}$ и наружного воздуха $t_{(\infty,\tau_j)}$ в различные моменты времени τ_j , где j принимает значения от 1 до 4, причем $\tau_4 - \tau_0 \leq 6$, определяют суммарные коэффициенты теплоотдачи у внешней поверхности ограждающей конструкции $\bar{\alpha}_j$, для моментов времени τ_j , среднюю массовую изобарную теплоемкость $C_{эк}$ и среднюю плотность $\rho_{эк}$ слоев ограждающей конструкции, j принимает значения, кратные долям часа (0,1...0,5...1) через равные промежутки времени в пределах τ_0 до максимального значения τ_{max} , при котором температурный потенциал достигает противоположной поверхности ограждающей конструкции, т.е. когда $t_{(x=\delta,\tau_{max})} \geq t_{(0,\tau_0)}$, а сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции $R_{экj}$ в любой из моментов времени τ_j определяют из выражения

$$\Theta = \frac{t_{(0,\tau_j)} - t_{(0,\tau_0)}}{t_{(\infty,\tau_j)} - t_{(0,\tau_0)}} = \frac{\bar{\alpha}_j \cdot R_{экj} \cdot (1-\eta)}{\bar{\alpha}_j \cdot R_{экj} + 1} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \text{Sin}[v_n \cdot (1-\eta)] \times \exp\left(-v^2 \cdot \frac{\tau_j}{\delta_i \cdot C_{эк} \cdot \rho_{эк} \cdot R_{экj}}\right)$$

где δ_i - толщина слоев ограждающей конструкции.

B1**029331****029331****B1**

Изобретение относится к строительству и может быть использовано для измерительной диагностики зданий и сооружений на соответствие сопротивлению теплопередаче ограждающей конструкции нормативным требованиям.

Известен способ теплового неразрушающего контроля многослойных объектов [1], в котором определяют временной интервал, необходимый для получения достоверного результата. В течение этого времени периодически измеряют температуру и плотность теплового потока на наружной и внутренней поверхностях объекта. Задают значения теплопроводности наружного слоя. Используя модель, определяют возможную температуру и плотность для каждого заданного значения теплопроводности. Проводят тепловизионное обследование, измеряют температуры внутренних и наружных поверхностей. Сравнивают теоретические и полученные измерением результаты. Выбирают для дальнейших расчетов значение теплопроводности из числа заданных, которое может обеспечить условия сравнения.

Способ позволяет определить локальные сопротивления теплопередаче обследуемых участков и найти более рациональное решение по обеспечению требуемого сопротивления, если оно окажется не соответствующим нормативному.

Известное техническое решение обладает рядом недостатков. Согласно известному способу наружную поверхность ограждения разбивают на сетку с определенным шагом, при этом каждый квадрат сетки является обследуемым участком, относительно которого проводятся измерения, расчеты и сравнение данных. Сравнение результатов во всех квадратах может привести к недостоверному результату, так как возможно суммирование ошибок измерений в большую сторону, при этом возможен вариант, когда все выделенные участки неоднородны и произведенные измерения будут неточны. Нанесение сетки на исследуемый объект известными способами делает процесс продолжительным по времени. Недостатками данного способа являются трудоемкость, длительность по времени, большая вероятность получения неточного результата и необходимость определения плотности теплового потока.

Известен способ определения сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции [2] - прототип, при котором измеряют температуру внешней поверхности ограждающей конструкции $t_{(0,\tau_0)}$ в начальный момент времени τ_0 , температуры внешней поверхности ограждающей конструкции $t_{(0,\tau_j)}$ и наружного воздуха $t_{(\infty,\tau_j)}$ в различные моменты времени τ_j , где j принимает значения от 1 до 4, причем $\tau_4 - \tau_0 \leq 6$ ч, определяют суммарные коэффициенты теплоотдачи у внешней поверхности ограждающей конструкции α_j , для моментов времени τ_j , среднюю массовую изобарную теплоемкость $C_{эж}$ и среднюю плотность $\rho_{эж}$ слоев ограждающей конструкции, а затем определяют сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции $R_{эжj}$ в любой из моментов времени τ_j из выражения

$$\Theta = 1 - \exp\left(\frac{-2 \cdot R_{эжj} \cdot \tau_j}{\sum \delta_i \cdot C_{эж} \cdot \rho_{эж}}\right) \cdot \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{-2}{\infty_j} \cdot \sqrt{\frac{R_{эжj} \cdot \tau_j}{\sum \delta_i \cdot C_{эж} \cdot \rho_{эж}}}\right)\right], \quad (1)$$

Недостатками данного способа являются трудность определения времени $\tau_4 - \tau_0 \leq 6$, когда необходимо прекратить измерения, решение уравнения (1) в чистом виде относительно $R_{эж}$ практически неосуществимо, из-за функции (erfc), необходимость проведения многих математических расчетов при использовании методов последовательных приближений для разных значений α , которые необходимо рассчитывать во время каждого измерения.

Задача, решаемая изобретением, заключается в более точном определении времени прекращения измерений τ_4 , упрощении решения задачи, снижении трудоемкости математических расчетов, сокращении продолжительности измерений, повышении вероятности получения более точного результата.

Поставленная задача решается тем, что измеряют температуру внешней поверхности ограждающей конструкции $t_{(0,\tau_0)}$ в начальный период времени τ_0 , температуры внешней поверхности ограждающей конструкции $t_{(0,\tau_j)}$ и наружного воздуха $t_{(\infty,\tau_j)}$ в различные моменты времени τ_j , где j принимает значения от 1 до 4, причем $\tau_4 - \tau_0 \leq 6$, определяют суммарные коэффициенты теплоотдачи у внешней поверхности ограждающей конструкции α_j , для моментов времени τ_j , среднюю массовую изобарную теплоемкость $C_{эж}$ и среднюю плотность $\rho_{эж}$ слоев ограждающей конструкции, j принимает значения, кратные долям часа (0,1...0,5...1), через равные промежутки времени в пределах τ_0 до максимального значения τ_{\max} , при котором температурный потенциал достигает противоположной поверхности ограждающей конструкции, т.е. когда $t_{(x=\delta,\tau_{\max})} \geq t_{(0,\tau_0)}$, а сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции $R_{эжj}$ в любой из моментов времени τ_j определяют из выражения

$$\Theta = \frac{t_{(0,\tau_j)} - t_{(0,\tau_0)}}{t_{(\infty,\tau_j)} - t_{(0,\tau_0)}} = \frac{\alpha_j \cdot R_{эжj} \cdot (1 - \eta)}{\alpha_j \cdot R_{эжj} + 1} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \operatorname{Sin}[v_n \cdot (1 - \eta)] \times \exp\left(-v^2 \cdot \frac{\tau_j}{\delta_i \cdot C_{эж} \cdot \rho_{эж} \cdot R_{эжj}}\right), \quad (2)$$

где δ_i - толщина слоев ограждающей конструкции.

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

При нагревании и охлаждении ограждающей конструкции в виде неограниченной пластины при ГУ III рода для определения относительной избыточной температуры можно воспользоваться выражением [3]:

$$\Theta = \frac{t_{(0,\tau_i)} - t_{(0,\tau_0)}}{t_{(\infty,\tau_i)} - t_{(0,\tau_0)}} = \frac{B_i \cdot (1-\eta)}{B_i + 1} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \text{Sin}[v_n \cdot (1-\eta)] \times \exp(-v_n^2 \cdot F_0), \quad (3)$$

$$B_i = \frac{\bar{\alpha}_{\text{эк}} \cdot \delta_i}{\lambda_{\text{эк}}}; F_0 = \frac{a \cdot \tau_j}{\delta_i^2},$$

где аргументы

$\bar{\alpha}_{\text{эк}}$ - коэффициент теплоотдачи у внешней поверхности, Вт/м²·°С;

δ_i - толщина слоен ограждающей конструкции, м;

$\lambda_{\text{эк}}$ - коэффициент теплопроводности тела, Вт/м·°С;

$$a = \frac{\lambda_{\text{эк}}}{C_{\text{эк}} \cdot \rho_{\text{эк}}}$$

- коэффициент температуропроводности, м²/ч;

$C_{\text{эк}}$ - массовая изобарная теплоемкость, кДж/кг·°С;

$\rho_{\text{эк}}$ - средняя плотность конструкции, кг/м³;

η - параметр толщины;

A_n - параметр амплитуды колебаний температуры.

Задача решается при начальных условиях: $t_{(\tau=0)} = t_0$;

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha \cdot (t_{(\infty,\tau_i)} - t_{(0,\tau_0)});$$

граничных условиях:

$$t_{(\infty,\tau_i)} = \text{Const} \quad t_{(x=\delta)} = t_0.$$

Т.е. в итоге относительная температура является функцией теплофизических характеристик ограждения, коэффициента теплоотдачи у наружной поверхности и продолжительности измерений.

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

$$\lambda_{\text{эк}} = \frac{\sum \delta_i}{R_{\text{эк}}}; \quad a = \sum \frac{\lambda_{\text{эк}}}{C_{\text{эк}} \cdot \rho_{\text{эк}}}; \quad R_{\text{эк}} = \sum \frac{\delta_i}{\lambda_{\text{эк}}};$$

$$B_i = \alpha \frac{\delta_i}{\lambda_{\text{эк}}} = \bar{\alpha} \cdot R_{\text{эк}}; \quad F_0 = \frac{a \cdot \tau}{\delta_i^2} = \frac{\tau}{C_{\text{эк}} \cdot \rho_{\text{эк}} \cdot \delta_i \cdot R_{\text{эк}}}.$$

Подставляя приведенные соотношения в (3), получим уравнение для определения сопротивления теплопередаче ограждения в виде:

$$\Theta = \frac{t_{(0,\tau_i)} - t_{(0,\tau_0)}}{t_{(\infty,\tau_i)} - t_{(0,\tau_0)}} = \frac{\bar{\alpha} \cdot R \cdot (1-\eta)}{\alpha \cdot R + 1} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \text{Sin}[v_n \cdot (1-\eta)] \times \exp\left(-v_n^2 \cdot \frac{\tau_i}{\delta_i \cdot C_{\text{эк}} \cdot \rho_{\text{эк}} \cdot R_{\text{эк}}}\right), \quad (4)$$

где $\bar{\alpha}_j$ - суммарный коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha} = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}$,

$\alpha_{\text{к}}$ и $\alpha_{\text{л}}$ - конвективный и радиационный коэффициент теплоотдачи, определяемые по расчетным зависимостям.

Пример осуществления предлагаемого способа.

Сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции определяется следующим образом.

Используя физико-математическую модель ограждающей конструкции как неограниченную пластину подвергаемую охлаждению или нагреву при ГУ III рода для определения относительной температуры Θ можно воспользоваться соотношением (3), где определяющие критерии:

$$B_i = \frac{\bar{\alpha}_{\text{эк}} \cdot \delta_i}{\lambda_{\text{эк}}}; F_0 = \frac{a \cdot \tau}{\delta_i^2}; \quad \eta = \frac{x}{\delta},$$

зависят от теплофизических характеристик многослойной конструкции, т.е. ($\lambda_{\text{эк}}$, $C_{\text{эк}}$, $\rho_{\text{эк}}$), коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}_{\text{эк}}$, времени τ_j и определяющего размера δ . Теплофизические характеристики входят

в коэффициент температуропроводности $a = \frac{\lambda_{\text{эк}}}{C_{\text{эк}} \cdot \rho_{\text{эк}}}$, который является определяющим при вычислении F_0 .

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 $\alpha_{\text{эк}} = \alpha_{\text{л}} - \alpha_{\text{к}}$; в пределах нормируемых. По этим значениям определяются критерии B_i и F_0 при различных $\lambda_{\text{эк}}$, $C_{\text{эк}}$, $\rho_{\text{эк}}$, и в заданные кратные промежутки времени между τ_0 и τ_{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 B_i и F_0 , по соотношению (3) или построенным номограммам [3] вычисляются зависимости $\Theta = f(F_0, B_i)$, по которым можно опосредованно определить зависимость $R = f(\Theta, \tau)$ в графическом виде при различных $\alpha_{\text{эк}}$.

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

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

Величину $R_{\text{эк}}$ в зависимости от полученных $\bar{\alpha}$ и заданного τ_j можно определить по графику $R = f(\Theta, \tau)$ в разные промежутки времени, определяя ее среднее значение $R_{\text{ср}} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_n}{n}$, или используя преобразованное относительно R соотношение (1).

Все изложенное можно показать на примере.

По выражению (3) построен график зависимости $\Theta = f(F_0, B_i)$, по которому можно опосредованно определить зависимость $R = f(\Theta, \tau)$, подставив различные значения Θ в разные промежутки времени.

Например, для $\alpha = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$.

Начальные условия:

t_0 , °C	ϑ , °C	α , Вт/(м ² ·°C)	h , м	C , кДж/(кг·°C)	ρ , кг/м ³	R , м ² ·°C/Вт			τ , ч		
0	-5	5	0,25	0,84	1000	0,6	1,0	1,4	1	2	5

Расчеты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета Θ при $\alpha = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$

R , м ² ·°C/Вт	0,6			1,0			1,4				
h , м	0,25										
λ , Вт/(м·°C)	0,42			0,25			0,18				
ρ , кг/м ³	1000										
C , кДж/(кг·°C)	0,84										
a , м ² /ч	0,0016			0,0010			0,0007				
τ , ч	1	2	5	1	2	5	1	2	5		
F_0	0,026	0,052	0,130	0,016	0,031	0,078	0,011	0,022	0,056		
α , Вт/(м ² ·°C)	5,0										
B_i	3,0			5,0			7,0				
Θ	0,36	0,46	0,58	0,44	0,53	0,66	0,51	0,57	0,72		

Расчетные формулы:

$$1. \quad \lambda = \frac{h}{R}; \quad 2. \quad a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C};$$

3. Θ - определяется по графикам [1].

По результатам таблицы 1 построен график зависимости $R = f(\Theta, \tau)$ при $\alpha = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ (фиг. 1).

Рассмотрим случай при $\alpha = 10,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$. Начальные условия:

t_0 , °C	ϑ , °C	α , Вт/(м ² ·°C)	h , м	C , кДж/(кг·°C)	ρ , кг/м ³	R , м ² ·°C/Вт			τ , ч		
0	-5	10	0,25	0,84	1000	0,6	1,0	1,4	1	2	5

Расчеты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета Θ при $\alpha=10,0$ Вт/(м²·°C)

$R, \text{ м}^2\cdot\text{°C}/\text{Вт}$	0,6			1,0			1,4		
$h, \text{ м}$	0,25								
$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{°C})$	0,42			0,25			0,18		
$\rho, \text{ кг}/\text{м}^3$	1000								
$C, \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{°C})$	0,84								
$a, \text{ м}^2/\text{ч}$	0,0016			0,0010			0,0007		
$\tau, \text{ ч}$	1	2	5	1	2	5	1	2	5
F_0	0,026	0,052	0,130	0,016	0,031	0,078	0,011	0,022	0,056
$\alpha, \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{°C})$	10,0								
B_i	6,0			10,0			14,0		
Θ	0,55	0,66	0,77	0,64	0,72	0,82	0,69	0,76	0,84

По результатам табл. 2 построен график зависимости $R=f(\Theta, \tau)$ при $\alpha=10,0$ Вт/(м²·°C) (фиг. 2).

Пример определения сопротивления теплопередаче по графическим зависимостям, построенным на основании расчетных величин (фиг. 1, 2) с использованием соотношений (1) и (2), по которым в [3] построены номограммы для определения опосредованно $R=f(\Theta, \tau)$.

В процессе исследований были определены следующие температуры в разные промежутки времени.

Время	$t_{(0, \tau_0)}$	$t_{(\infty, \tau_j)}$	$t_{(0, \tau_j)}$	$t_{(x=\delta, \tau_j)}$	Θ	$R_{экj}$
$\tau_1 = 1$ час	-5,0	-10,0	-8,1	-5,0	0,62	0,9
$\tau_2 = 2$ часа	-5,0	-10,0	-8,65	-5,0	0,73	1,11
$\tau_3 = 5$ часов	-5,0	-10,0	-9,05	-5,1	0,81	0,93

По графику (фиг. 2) получены значения:

$R_{эк1}=0,9$; $R_{эк2}=1,11$; $R_{эк3}=0,93$.

Средняя из измеренных величин:

$$R_{экp} = \frac{0,9 + 1,11 + 0,93}{3} = 0,98 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{°C})$$

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

Таким образом, можно сделать вывод, что расчетное соотношение (1) показывает адекватность проведенным натурным измерениям, а построенными по нему графиками, т.е. 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 решается с заданной точностью при сокращении количества измерений.

Источники информации.

1. Патент РФ № 2219534, кл. G01N 25/72 от 12.09.2002 г.
2. Патент ВУ 16191 С1, МПК G01N 25/18 (2006.01).
3. Пехович А.И. Расчеты теплового режима твердых тел//А.И. Пехович, В.М. Житких// "Энергия", Л., 1968. - 304 с. с рис.

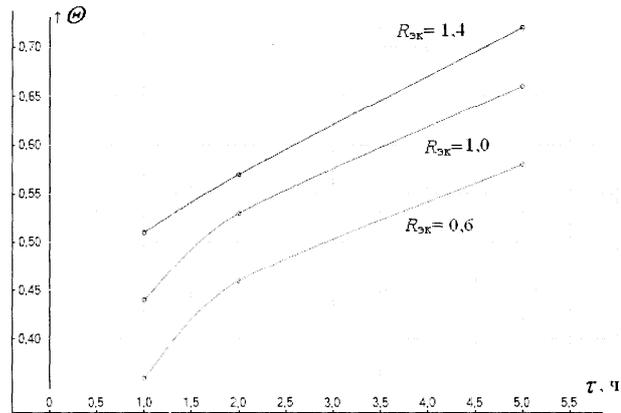
ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Способ определения сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, при котором измеряют температуру внешней поверхности ограждающей конструкции $t_{(0, \tau_0)}$ в начальный момент времени τ_0 , температуры внешней поверхности ограждающей конструкции $t_{(0, \tau_j)}$ и наружного воздуха $t_{(\infty, \tau_j)}$ в различные моменты времени τ_j , где j принимает значения от 1 до 4, причем $\tau_4 - \tau_0 \leq 6$, определяют суммарные коэффициенты теплоотдачи у внешней поверхности ограждающей конструкции α_j , для моментов времени τ_j , среднюю массовую изобарную теплоемкость $C_{эк}$ и среднюю плотность $\rho_{эк}$ слоев ограждающей конструкции, отличающийся тем, что τ_j принимает значения, кратные долям часа (0,1...0,5...1), через равные промежутки времени в пределах от τ_0 до максимального значения τ_{max} , при котором температурный потенциал достигает противоположной поверхности ограждающей конструкции, т.е. когда $t_{(x=\delta, \tau_{max})} \geq t_{(0, \tau_0)}$, а сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции $R_{экj}$ в любой из моментов времени τ_j определяют из выражения

$$\Theta = \frac{t_{(0, \tau_j)} - t_{(0, \tau_0)}}{t_{(\infty, \tau_j)} - t_{(0, \tau_0)}} = \frac{\alpha_j \cdot R_{экj} \cdot (1 - \eta)}{\alpha_j \cdot R_{экj} + 1} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \text{Sin}[\nu_n \cdot (1 - \eta)] \times \exp\left(-\nu^2 \cdot \frac{\tau_j}{\delta_i \cdot C_{эк} \cdot \rho_{эк} \cdot R_{экj}}\right), \quad (1)$$

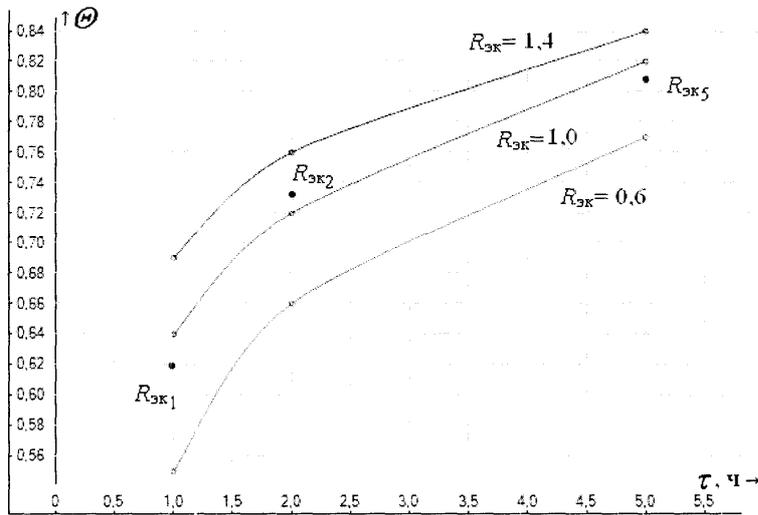
где δ_i - толщина слоев ограждающей конструкции.

График зависимости $R=f(\Theta, \tau)$ при $\alpha=5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$
 $\alpha = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.



Фиг. 1

График зависимости $R=f(\Theta, \tau)$ при $\alpha=10,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$
 $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.



Фиг. 2



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2