

УДК 624.012.8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ НАРУЖНЫХ СТЕН, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ КИРПИЧА, ЗДАНИЙ ПОСТРОЙКИ 60–80-Х ГОДОВ XX ВЕКА

Макаров Р.А., Муреев П.Н., Макаров А.Н.

*ФГОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет»,
Йошкар-Ола, e-mail: morrich92@gmail.com*

Проведён анализ и перечислены основные недостатки существующих способов определения фактического сопротивления теплопередаче наружных стен. Перечислены причины большой погрешности результатов измерений существующих способов определения сопротивления теплопередаче. Показаны условия стационарного режима теплопередачи в общем случае. Для однослойной кирпичной стены найдены условия стационарного режима теплопередачи в зависимости от коэффициента теплоусвоения внутренней поверхности ограждения, амплитуды колебания теплового потока и амплитуды колебания температуры на внутренней поверхности ограждения. Введен параметр отклонения фактического распределения температур от теоретического в толще стенового ограждения. Показана схема лабораторной установки, расположенной в здании постройки 60–80-х годов XX века с наружными кирпичными стенами, для определения фактического сопротивления теплопередаче. Введена дополнительная поправка к определению фактического сопротивления теплопередаче, учитывающая нелинейное распределение температур в толще стенового ограждения. Приведён алгоритм и пример определения фактического сопротивления теплопередаче однослойной кирпичной стены.

Ключевые слова: сопротивление теплопередаче, нестационарный режим теплопередачи, стационарный режим теплопередачи, коэффициент теплоусвоения, однослойная кирпичная стена, распределение температуры в толще стены

DETERMINATION OF THE ACTUAL THERMAL RESISTANCE OF EXTERNAL BRICK WALLS IN THE BUILDINGS, WHICH WERE BUILT IN THE 60'S – 80'S OF THE 20 TH CENTURY

Makarov R.A., Mureev P.N., Makarov A.N.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Volga State
University of Technology», Yoshkar-Ola, e-mail: morrich92@gmail.com*

The analysis is made and the main disadvantages of the methods of determining the actual thermal resistance of external walls are recited. The reasons of the high error in measurement results of the methods of determining the resistance of heat transfer are enumerated. The conditions of stationary heat transfer are demonstrated in general case. Conditions of stationary heat transfer for single-layer brick walls are found subject to a coefficient of heat absorption on the internal surface of the wall fence; of the amplitude variation of thermal flow and of the amplitude temperature variation on the internal surface of the wall fence. The parameter of the deviation of the actual temperature distribution from the theoretical temperature distribution in the thickness of the wall fence is infused. A diagram of the laboratory setup, which belongs to the brick building of the 60s-80s of the 20th century, is represented to determine the actual thermal resistance. The additional amendment is introduced to determine the actual resistance of heat transfer, which includes the non-linear temperature distribution in the thickness of the wall fence. Algorithm and the example of determining the actual heat resistance of a single-layer brick wall are given.

Keywords: thermal resistance, non-stationary heat transfer, stationary heat transfer, coefficient of heat absorption, single-layer brick wall, temperature distribution in the thickness of the wall

После изменений СНиП «Тепловая защита зданий» от 23.02.2003 требуемое сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций вновь строящихся и реконструируемых зданий возросло более чем в 3 раза. При реконструкции зданий, проекты которых были разработаны до 23.02.2003, возникла проблема определения фактического сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций. В результате измерений полученные значения сопротивления теплопередаче одной и той же ограждающей конструкции могут различаться в два и более раз.

В Российской Федерации на практике используется способ определения качества объектов по анализу их сопротивления теплопередаче – см. ГОСТ 26254-84. «Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций», введен постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 02 августа 1984 года № 127, УДК 624.01.001.006.354. Описанный здесь способ заключается в измерении плотности теплового потока через контролируемое ограждение и температуры сред около ее поверхностей в течение не менее

чем 15 суток при достижении в контролируемом ограждении стационарного или близкого ему теплового режима. Достижение данного режима определяется по поведению измеряемой температуры наружной и внутренней поверхности ограждения.

Данный метод прост и нагляден, однако имеет недостаток, который ограничивает область его применения и значительно снижает точность получаемых результатов. Метод применим только при условии стационарности процесса теплопередачи через контролируемое сооружение (т.е. только при условии постоянства теплового потока, входящего в сооружение) на одной поверхности и выходящего из сооружения на другой поверхности.

На практике при тепловом контроле сооружений с реальным изменением во времени температуры сред это условие соблюдается крайне редко. Несоблюдение условия постоянства плотности теплового потока приводит к появлению больших ошибок в определении сопротивления теплопередаче – до 300–500% [3].

Основные недостатки существующих способов определения термического сопротивления:

- измерения производятся на образце, а не на самой ограждающей конструкции, что не позволяет учитывать внешние воздействия (солнечную радиацию, давление ветра и осадки);

- измерения производятся в течение небольшого промежутка времени и не учитывают изменение влажности материала конструкции в течение всего года;

- во время измерений режим теплопередачи нестационарный, что приводит к большой погрешности измерений.

Как отмечается в [3], в стационарных условиях, по определению, тепловые потоки снаружи и внутри стен равны друг другу [1, 4–6]. Установить наличие стационарного режима, измеряя и сопоставляя их, было бы наиболее просто. Однако измерения плотности теплового потока, особенно наружного, имеют невысокую точность, и такое сопоставление не является надёжным критерием.

Кроме того, даже в условиях, которые могут быть признаны вполне стационарными, наружные тепловые потоки столь чувствительны к любым внешним факторам (ветер, солнечное излучение, осадки и т.п.), что их мгновенные значения почти всегда сильно отличаются от довольно стабильных значений тепловых потоков на внутренней поверхности.

$$R = \frac{\Delta T}{q}, \quad (1)$$

где R – сопротивление теплопередаче участка стены, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$; ΔT – разность темпе-

ратур на внутренней и наружной поверхностях, °C ; q – тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

При нестационарном режиме теплопередачи определение термического сопротивления по формуле (1) приведёт к большим погрешностям, т.к. изменение температуры в толще и на поверхности стенового ограждения будет зависеть от колебаний температуры внутреннего и наружного воздуха, солнечной радиации и других внешних воздействий. Колебания температуры на внутренней поверхности ограждения вызывают в свою очередь колебания температуры в толщине ограждения. По мере удаления от внутренней поверхности амплитуды колебания температуры будут постепенно уменьшаться, т.е. затухать в толще ограждения [6]. Всё это приводит к непостоянной плотности теплового потока.

Тепловой поток через ограждающую конструкцию будет стационарным, если амплитуда колебания теплового потока A_0 равна нулю. Значение коэффициента теплоусвоения материала ограждения s определяется по формуле

$$s = \sqrt{\frac{2\pi\lambda \cdot \gamma}{z}}, \quad (2)$$

где s – коэффициент теплоусвоения материала ограждения, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$; c – удельная теплоёмкость, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$; γ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; z – период колебания теплового потока, ч.

В формуле (2) коэффициент теплоусвоения s для ограждения, состоящего из одного материала и имеющего большую толщину, зависит только от свойств материала ограждения. Коэффициент теплоусвоения материала увеличивается с уменьшением периода колебания теплового потока z .

$$\lim_{z \rightarrow 0} s = \infty; \quad (3)$$

$$Y_{\text{в}} = \frac{A_0}{A_{\text{т}}}, \quad (4)$$

где $Y_{\text{в}}$ – коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности ограждения, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; A_0 – амплитуда колебания теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $A_{\text{т}}$ – амплитуда колебания температуры на внутренней поверхности, °C .

В этом случае по формуле (4) колебания температуры на внутренней поверхности ограждения $A_{\text{т}}$ будут отсутствовать, следовательно, имеем случай стационарного теплового потока.

Таким образом, при соблюдении равенства (3) тепловой поток будет стационарным, значит, для определения фактического значения сопротивления теплопередаче можно воспользоваться формулой (1).

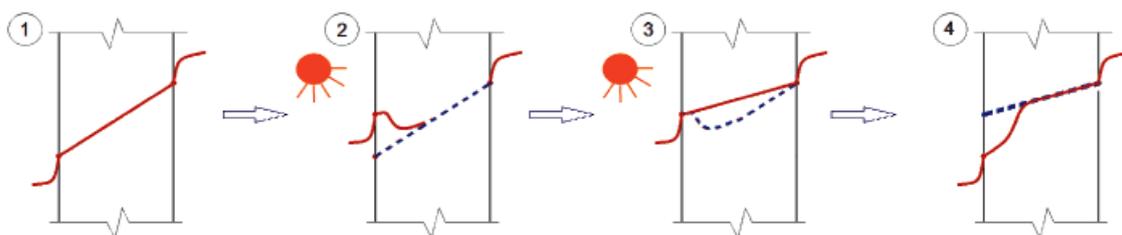


Рис. 1. Распределение температуры в толще стены в течение суток

При проведении эксперимента удобно за основной параметр принять температуру внутренней поверхности ограждающей конструкции и фиксировать временные промежутки, на которых $A_{\tau} = 0$.

Данная теория применима, если температура наружной поверхности имеет постоянное значение. Но при постоянстве температуры на внутренней поверхности величина интервала значений температуры наружной поверхности может составлять 20°C и более. Это связано с воздействием солнечной радиации в дневное время суток. Температура во внутреннем слое стенового ограждения при этом не успевает выравниваться к линейному распределению температур (рис. 1). Имеет место физический эффект встречных тепловых потоков – резкое изменение температуры в слое, где встречаются два противоположно направленных тепловых потока [2].

В период времени 2 и 4 температура на внутренней поверхности будет постоянной, но значения теплового потока будут различными из-за различной температуры наружной поверхности. В связи с этим режим теплопередачи будет нестационарным, что не позволяет нам использовать формулу (1).

Для решения поставленной задачи была разработана лабораторная установка. Установка расположена в общежитии № 6 ПГТУ.

Характеристика здания:

- год постройки – 1980;
- наружные стены – кирпич силикатный, 640 мм;
- Период колебания теплового потока z – 12 часов.

Лабораторная установка (рис. 2) представляет собой совокупность датчиков, адаптера и центра управления.

Фактическое значение сопротивления теплопередаче зависит от толщины стенового ограждения и теплопроводности его материала. Единственным изменяемым параметром является коэффициент теплопроводности, который зависит от влажности материала стенового ограждения. Скорость изменения влажности материала ниже скорости изменения температуры в толще ограждения. Исходя из этого, при

рассмотрении интервалов с постоянной температурой в исследуемых плоскостях фактическое сопротивление теплопередаче всего стенового ограждения можно принять постоянным, т.е. $R_{\text{факт}} = \text{const}$. Выразим из формулы (1) величину теплового потока:

$$q = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{\text{факт}}}, \quad (5)$$

где q – тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $t_{\text{в}}$ – температура внутренней поверхности стены, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{н}}$ – температура наружной поверхности стены, $^{\circ}\text{C}$; $R_{\text{факт}}$ – фактическое сопротивление теплопередаче наружной стены, $(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$.

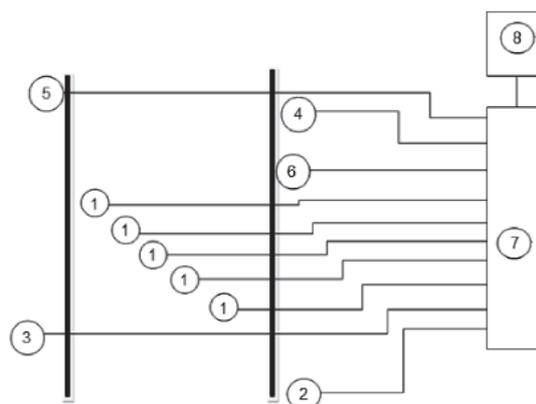


Рис. 2. Схема установки для определения сопротивления теплопередаче:

- 1 – датчики температуры и влажности материала, 5 шт. Расположены в толще ограждающей конструкции через 110 мм; 2 – датчики температуры и влажности воздуха в помещении; 3 – датчики температуры и влажности наружного воздуха; 4 – датчик температуры внутренней поверхности; 5 – датчик температуры наружной поверхности; 6 – датчик теплового потока; 7 – адаптер; 8 – центр управления. Информация с датчиков поступает через адаптер в центр управления, а затем на ПК. Шаг измерений – 1 мин

Тепловой поток будет постоянным, если разность температур наружной и внутренней поверхностей будет постоянной, т.е. $t_{\text{в}} - t_{\text{н}} = \text{const}$, но это не является необходимым и достаточным условием стационарности

режима теплопередачи (см. выше физический эффект встречных тепловых потоков). Для исключения временных интервалов с непостоянным тепловым потоком необходимо оставить лишь те интервалы, где распределение температур в толще стенового ограждения будет по прямой, проходящей через точки с температурой t_b и t_n .

обходимо определить время прохождения локального экстремума температуры от наружной поверхности до i -й измеряемой плоскости. Сумма этих временных интервалов t_v будет временем прохождения локального экстремума до внутренней поверхности стены. Стоит отметить, что время прохождения t_v температуры t_{min} напрямую

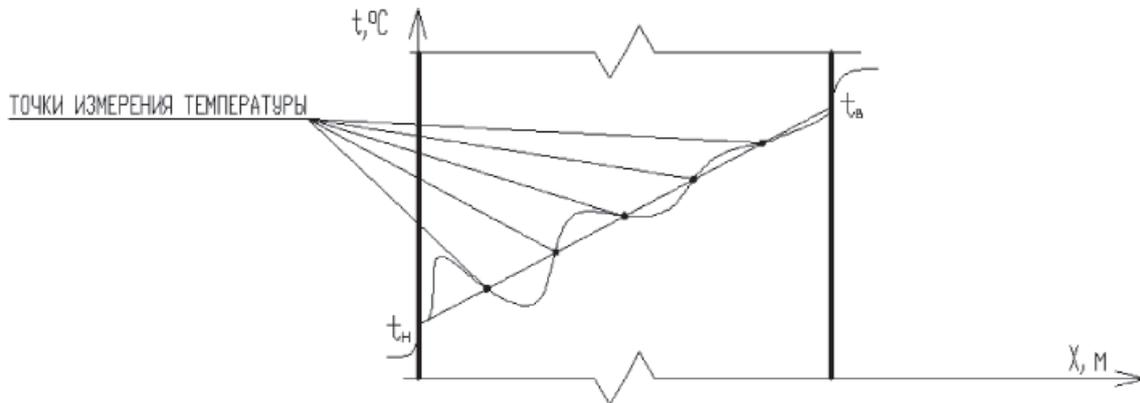


Рис. 3. Возможное фактическое и теоретическое распределение температуры в толще стены

Очевидно, среди всего периода измерений количество временных промежутков, удовлетворяющих этому требованию, будет мало или не будет совсем. Введём коэффициент Δt :

$$\Delta t = \max \left(\frac{|t_{\tau i} - t_{\phi i}|}{t_{\tau i}} \right), \quad (6)$$

где $t_{\phi i}$ — фактическое значение температуры в i -м слое, °С; $t_{\tau i}$ — теоретическое значение температуры в i -м слое, °С, т.е. при линейном распределении температуры в толще стены.

Распределение температур будем считать линейным, если $\Delta t \leq \Delta t_{\text{треб}}$, где $\Delta t_{\text{треб}}$ — допустимая погрешность получения результатов измерения. Всего в толще ограждения 5 точек измерения температуры. Возможен случай (рис. 3), когда локальные экстремумы будут располагаться не в точках контроля, а между ними, т.е. условие $\Delta t \leq \Delta t_{\text{треб}}$ будет выполняться, но распределение температур не будет линейным с заданной допустимой погрешностью $\Delta t_{\text{треб}}$.

При изменении температуры наружной поверхности температура в толще ограждения изменяется с задержкой, увеличивающейся по мере удаления от наружной поверхности.

Для нахождения длительности периода, в котором температура в толще стенового ограждения будет распределяться с заданной погрешностью $\Delta t_{\text{треб}}$ по прямой, не-

зависит от абсолютной разности температур t_{min} и температуры наружной поверхности t_n ; чем больше изменилась абсолютная разность температур, тем меньше значение t_v , т.е. для каждого значения абсолютной разности t_{min} и t_n будет своё значение t_v .

Алгоритм нахождения фактического сопротивления теплопередаче:

1. Выделяем промежутки времени $t_{\text{стац}}$ в период которых амплитуда колебаний температуры наружного воздуха не более 2°С и длительность которых не менее времени тепловой инерции стены. Для стены из силикатного кирпича время тепловой инерции составляет примерно 24 часа [3].

2. Находим время прохождения t_v ближайшего локального экстремума температур от наружной до внутренней поверхности стены.

3. Исключаем из начала выделенного промежутка $t_{\text{стац}}$ период времени, равный t_v . Дальнейшие операции проводим с оставшимся промежутком $t_{\text{стац}1}$. В случае, если $t_v > t_{\text{стац}}$, данный интервал не подходит для определения сопротивления теплопередаче.

4. Задаёмся допустимой погрешностью $\Delta t_{\text{треб}}$.

5. Проверяем условие $\Delta t \leq \Delta t_{\text{треб}}$ для каждого результата измерения. Если условие не выполняется, данный результат исключается из временного интервала $t_{\text{стац}1}$. Если доля исключённых результатов превышает значение $\Delta t_{\text{треб}}$, данный интервал $t_{\text{стац}1}$ не подходит для определения сопротивления теплопередаче.

6. На основе оставшихся результатов вычисляется фактическое значение сопротивления теплопередаче по формуле

$$R_{\text{факт}} = \frac{t_{\text{в}}^{\text{ср}} - t_{\text{н}}^{\text{ср}}}{Q_{\text{ср}}} \pm \Delta R; \quad (7)$$

$$\Delta R = \frac{t_{\text{в}}^{\text{ср}} - t_{\text{н}}^{\text{ср}}}{Q_{\text{ср}}} \cdot \Delta t_{\text{треб}},$$

где $R_{\text{факт}}$ – фактическое сопротивление теплопередаче, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$; ΔR – поправка термического сопротивления, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$; $t_{\text{н}}^{\text{ср}}$ – среднее значение температуры наружной поверхности, °C ; $t_{\text{в}}^{\text{ср}}$ – среднее значение температуры внутренней поверхности, °C ; $Q_{\text{ср}}$ – среднее значение теплового потока за выделенный промежуток $t_{\text{стан}1}$, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Эксперимент проводится в течение всего отопительного периода. На основе полученных данных находится $R_{\text{факт}}$ для каждого промежутка времени, удовлетворяющего пунктам 1 и 3 алгоритма, и выбирается наименьшее значение $R_{\text{факт}}$, которое и рекомендуется принимать в качестве фактического значения сопротивления теплопередаче для теплотехнического расчёта реконструируемых зданий.

$$\Delta R = \frac{t_{\text{в}}^{\text{ср}} - t_{\text{н}}^{\text{ср}}}{Q_{\text{ср}}} \cdot \Delta t_{\text{треб}} = \frac{17,93 \text{ °C} - 3,53 \text{ °C}}{31,30 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}} \cdot 0,07 = 0,03 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}};$$

$$R_{\text{факт}} = \frac{t_{\text{в}}^{\text{ср}} - t_{\text{н}}^{\text{ср}}}{Q_{\text{ср}}} \pm \Delta R = \frac{17,93 \text{ °C} - 3,53 \text{ °C}}{31,30 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}} \pm 0,03 = 0,46 \pm 0,03 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

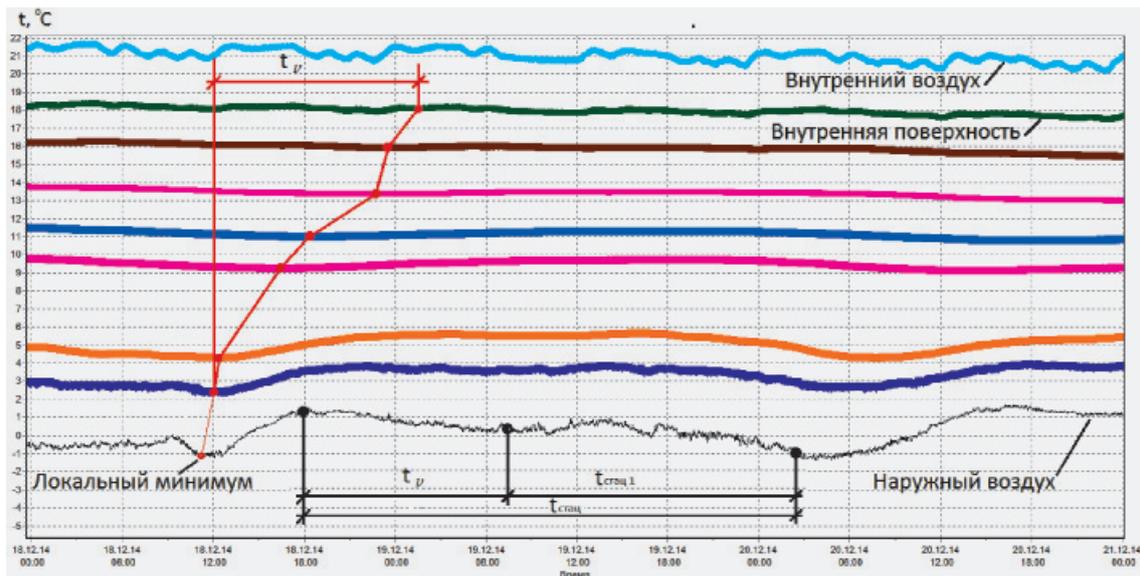


Рис. 4. Распределение температуры в толще стенового ограждения по времени с выделением временных промежутков со стационарным режимом теплопередаче

Пример расчёта

сопротивления теплопередаче

1. Рассмотрим промежуток времени с 18 по 21 декабря 2014 года. Как видно из рис. 4, промежуток времени с 18:00 18 декабря по 2:00 20 декабря длительностью 32 часа удовлетворяет условию 1 алгоритма, т.е. больше 24 часов, и амплитуда колебаний температуры не превышает 2 °C . Принимаем этот промежуток за $t_{\text{стан}}$.

2. Величина ближайшего локального экстремума температуры наружного воздуха составляет -1 °C . Из рис. 4 величина t_v составляет 13 часов.

3. Исключаем из периода $t_{\text{стан}}$ с 18:00 18 декабря по 2:00 20 декабря промежуток времени t_v длительностью 13 часов. Оставшийся промежуток времени с 7:00 19 декабря по 2:00 20 декабря принимаем за $t_{\text{стан}1}$. Длительность промежутка $32 - 13 = 19$ часов.

4. Принимаем допустимую погрешность измерений $\Delta t_{\text{треб}} = 0,07$.

5. Проверяем условие $\Delta t \leq \Delta t_{\text{треб}}$ для каждого результата измерения. В результате обработки данных из общего числа результатов (1142 измерения) 1,3% (15 измерений) было исключено из выборки.

6. На основе оставшихся результатов вычисляется фактическое значение сопротивления теплопередаче:

При использовании данной методики рекомендуется брать минимальное значение сопротивления теплопередаче, т.е.

$$R_{\text{факт}} = 0,46 - 0,03 = 0,43 \text{ Вт/м}^2.$$

Список литературы

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967.
2. Патент РФ № 2010132407/28, 02.08.2010. Муреев П.Н., Куприянов В.Н., Краева Т.И., Котлов В.Г., Муреев К.П. Способ оценки теплофизических характеристик ограждающей конструкции зданий и сооружений, выполненных из кирпича, в зимний период по результатам испытаний в натуральных условиях // Патент России № 2454659. Бюл. № 18.
3. Патент РФ № 2010142067/28, 14.10.2010. Зувев В.И., Коршунов О.В., Сенновский Д.В., Троицкий-Марков Р.Т. Способ определения термического сопротивления участка элемента конструкции при нестационарном режиме теплопередачи // Патент России № 2457471. Бюл. № 21.
4. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А., Соловьев С.Л. Теплообмен в ядерных энергетических установках. – 3-е изд. – Гл. 2. Уравнение теплопроводности и методы его решения. – М.: Изд. МЭИ, 2003.
5. Телегин А.С., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. Тепло-массоперенос. – 2-е изд. – Гл. 2. Теплопроводность. – И.: ИКЦ «Академкнига», 2002.
6. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. – 5-е изд. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. – С. 256.

References

1. Lykov A.V. Teorija teploprovodnosti. M.: Vysshaja shkola, 1967.
2. Patent RF no. 2010132407/28, 02.08.2010. Mureev P.N., Kuprijanov V.N., Kraeva T.I., Kotlov V.G., Mureev K.P. Sposob ocenki teplofizicheskikh harakteristik ograzhdajushhij konstrukcij zdaniy i sooruzhenij, vypolnennyh iz kirpicha, v zimnij period po rezul'tatam ispytaniy v naturnyh uslovijah//Patent Rossii no. 2454659. Bjul. no. 18.
3. Patent RF no. 2010142067/28, 14.10.2010. Zuev V. I., Korshunov O.V., Sennovskij D.V., Troickij-Markov R.T. Sposob opredelenija termicheskogo soprotivlenija uchastka jelementa konstrukcii pri nestacionarnom rezhime teploperedachi //Patent Rossii no. 2457471. Bjul. no. 21.
4. Petuhov B.S., Genin L.G., Kovalev S.A., Solovjev S.L. Teploobmen v jadernyh jenergeticheskikh ustanovkah. Izd. 3. Gl. 2. Uravnenie teploprovodnosti i metody ego reshenija. M.: Izd. MJEI, 2003.
5. Telegin A.S., Shvydkij B.C., Jaroshenko Ju.G. Teplo-massoperenos. Izd. 2. Gl. 2. Teploprovodnost. I.: IKC «Akademkniga», 2002.
6. Fokin K.F. Stroitel'naja teplotehnika ograzhdajushhijh chastej zdaniy. 5-e izd. AVOK-PRESS, 2006, pp. 256.

Рецензенты:

Поздеев А.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой СКИВ, ФГБОУ ВПО ПГТУ, г. Йошкар-Ола;

Алибеков С.Я., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой машиностроения и материаловедения, ФГБОУ ВПО ПГТУ, г. Йошкар-Ола.