

doi: 10.5862/MCE.52.4

## Многофакторная оценка теплового режима в элементах оболочки здания

*К.т.н., доцент С.В. Корниенко,**Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

**Аннотация.** Тепловой режим ограждающих конструкций зданий формируется под действием многих факторов. Сложность этого процесса делает актуальной проблему многофакторной оценки теплового режима.

В данной статье на основе разработанного автором метода многофакторной оценки теплового режима в элементах оболочки здания выполнена оценка теплоизолирующего эффекта от применения композиционного покрытия «керамические микросферы – связующее» в качестве дополнительной тепловой защиты смещенного невентилируемого покрытия здания.

Показано, что применение композиционного покрытия имеет практически нулевой теплоизолирующий эффект и не обеспечивает нормируемый уровень тепловой защиты ограждающей конструкции в холодный период года. В то же время применение традиционного варианта утепления базовой конструкции минераловатными плитами позволяет повысить теплозащитные свойства конструкции до уровня норм. Такой вариант утепления дает наилучший показатель и по теплоустойчивости, обеспечивая минимальные тепlopоступления в теплый период года.

**Ключевые слова:** тепловая защита зданий; элемент оболочки здания; метод расчета; компьютерная программа; математическое моделирование; композиционное покрытие «керамические микросферы – связующее»

### *Введение*

Тепловая защита зданий является ключевым аспектом проблем энергосбережения и повышения энергоэффективности. При этом оценка теплового режима здания является сложной задачей, так как на него оказывает влияние множество факторов. Так, теплозащитная оболочка здания состоит из элементов, неоднородных по теплофизическим и геометрическим свойствам. Перенос тепла через нее происходит, как правило, по двух- и трехмерной схемам. Теплофизические свойства материалов, составляющих оболочку, зависят от температуры, которая изменяется во времени, подвергаясь значительному воздействию микроклимата помещений и наружного климата. Между окружающей средой и поверхностями оболочки здания происходит сложный теплообмен в виде конвекции и излучения. Например, в теплый период года наружная поверхность здания подвержена действию интенсивного солнечного излучения. Кроме того, в помещениях здания находятся различные источники бытовых тепlopоступлений, которые также оказывают существенное влияние на температурный режим здания. Тепловые процессы в оболочке здания могут иметь различную интенсивность.

Сложность процесса переноса тепла через ограждающие конструкции делает актуальной проблему многофакторной оценки теплового режима в элементах оболочки здания. Решению этой проблемы посвящены работы [1–35].

### *Обзор литературы*

В 1960–70 гг. большое развитие получили операционные методы решения уравнения теплопроводности для одно-, двух- и трехмерных температурных полей в неоднородных средах с применением интегральных преобразований [1]. Многочисленные аналитические решения задач данного типа приведены в монографии [2].

Конвективный и лучистый теплообмен в помещении подробно исследован в монографиях [3, 4]. В монографии [5] приведены уравнения для расчета коэффициентов конвективного теплообмена для внутренних поверхностей ограждающих конструкций в случае свободной, вынужденной и смешанной конвекции. Там же дана методика расчета коэффициентов конвективного и лучистого теплообмена для наружных поверхностей ограждающих конструкций.

В 1970–80 гг. получили широкое распространение численные методы расчета температурных полей в неоднородных ограждающих конструкциях с переменными теплофизическими характеристиками – так называемые интегро-интерполяционные методы.

Корниенко С.В. Многофакторная оценка теплового режима в элементах оболочки здания

Теоретические основы этих методов для расчета температурных полей изложены в книге [6]. Подробные алгоритмы расчета приведены в книгах [7–9]. В настоящее время расчеты температурных полей осуществляются с помощью специализированных компьютерных программ и программно-вычислительных комплексов [10–19].

Повышению теплозащиты элементов оболочки здания при решении проблемы энергосбережения посвящены статьи [20–35].

Несмотря на большое количество работ, посвященных вопросам энергосбережения в зданиях, актуальность проблемы многофакторной оценки теплового режима в элементах оболочки здания сохраняется. Повышение требований к качеству проектирования тепловой защиты зданий приводит к необходимости дальнейшего уточнения математических моделей теплопереноса на основе более полного учета различных факторов, действующих на оболочку здания, и разработки эффективных компьютерных программ.

### Метод исследования

В основу метода многофакторной оценки теплового режима положена математическая модель нестационарного переноса теплоты в трехмерных элементах оболочки здания.

Под элементом оболочки здания понимается совокупность соединенных между собой ограждающих конструкций, представляющая собой часть теплозащитной оболочки здания. В частном случае элемент оболочки может состоять из одной ограждающей конструкции.

Температурное поле в данный момент времени  $\tau$  определяется распределением температуры  $t$  в элементе, т. е. функцией  $t = t(x, y, z, \tau)$ , где  $(x, y, z)$  – декартовы координаты. Тепловой поток направлен из области с более высокой температурой в область с более низкой температурой.

Основное положение теории теплопроводности, известное как закон теплопроводности Фурье, состоит в предположении пропорциональности теплового потока градиенту температуры в однородной неподвижной среде:  $q = -\lambda \text{grad}t$ , где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности (теплопроводность). Уравнение переноса теплоты может быть получено на основании закона сохранения энергии в виде:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = -\text{div} q + f, \quad (1)$$

где  $c$  и  $\rho$  – соответственно удельная теплоемкость и плотность материала среды;  $f$  – удельная мощность внутренних источников теплоты.

Подстановка выражения для потока теплоты в формулу (1) позволяет записать следующее основное дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \text{div} \left( \lambda \text{grad}t \right) + f. \quad (2)$$

Коэффициенты и правая часть уравнения теплопроводности могут зависеть от точки пространства (неоднородная среда). В этом случае  $c = c(x, y, z)$ ,  $\rho = \rho(x, y, z)$ ,  $\lambda = \lambda(x, y, z)$ ,  $f = f(x, y, z)$ , а само уравнение теплопроводности является линейным параболическим уравнением второго порядка.

Если теплофизические свойства среды зависят от температуры ( $c = c(t)$ ,  $\rho = \rho(t)$ ,  $\lambda = \lambda(t)$ ,  $f = f(t)$ ), то уравнение (2) является квазилинейным уравнением теплопроводности.

Уравнение теплопроводности в прямоугольной декартовой системе координат  $(x, y, z)$  получается на основе приведенной инвариантной записи (уравнение (2) с учетом того, что

$$\text{grad} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right\}, \quad \text{div} \mathbf{q} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}.$$

Отсюда следует, что уравнение (2) можно записать следующим образом:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + f. \quad (3)$$

Для однозначного определения температурного поля  $t(x, y, z, \tau)$  необходимо сформулировать дополнительные соотношения (краевые условия).

Обычно считается, что температурное поле задано в начальный момент времени, т. е.

$$t(x, y, z, 0) = t_0(x, y, z). \quad (4)$$

Теплообмен между поверхностью тела и окружающей средой, имеющей температуру  $t_a$ , описывается граничными условиями третьего рода:

$$\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right) + \alpha (t - t_a) = q_{sur} = 0, \quad (5)$$

где через  $\partial/\partial n$  обозначена внешняя по отношению к рассматриваемой области нормаль;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена;  $q_{sur}$  – тепловой поток на поверхности рассматриваемого тела.

На границах материалов с различными теплофизическими характеристиками необходимо задать условия сопряжения, отражающие непрерывность температуры и теплового потока в виде:

$$[t] = 0, \quad (6)$$

$$\left[ \lambda \frac{\partial t}{\partial n} \right] = 0, \quad (7)$$

где в квадратных скобках обозначен скачок при переходе границы контакта.

Математическая модель (3)–(7) описывает нестационарный процесс переноса теплоты в трехмерных элементах оболочки здания.

На основе указанной математической модели разработан метод многофакторной оценки теплового режима в элементах оболочки здания [35]. При этом учитываются следующие факторы:

- трехмерность температурного поля в ограждающих конструкциях разнообразной геометрической структуры;
- нестационарность теплового режима;
- нелинейность тепловых характеристик строительных материалов, их зависимость от координат и температуры;
- нелинейность тепловых источников в элементах оболочки здания, зависимость их удельной мощности от координат и температуры;
- динамика облучения наружной поверхности оболочки солнечной радиацией;
- динамика облучения внутренней поверхности оболочки тепловыми источниками;
- теплообмен поверхностей оболочки с окружающей средой посредством конвекции и излучения;
- возможность исследования тепловых процессов различной интенсивности;
- возможность расчета температурного поля с заданной точностью.

Математическая модель теплопереноса реализована в компьютерной программе «Нестационарное температурное поле (НТП)» [27]. Программа позволяет производить расчет нестационарного температурного поля в трехмерных элементах оболочки здания. Результаты расчета по программе «НТП» обеспечивают возможность всестороннего анализа теплового режима ограждающих конструкций.

Достоинствами компьютерной программы являются:

- расчет температурного поля ограждающих конструкций разнообразной геометрической структуры;
- возможность задания неравномерной пространственно-временной сетки для оптимизации вычислительного процесса;
- автоматический выбор временного шага, обеспечивающий заданную точность вычислений;
- удобный пользовательский интерфейс;
- применимость программы для исследования нестационарных тепловых процессов различной интенсивности.

Принципиальная блок-схема компьютерной программы «НТП» представлена на рисунке 1.

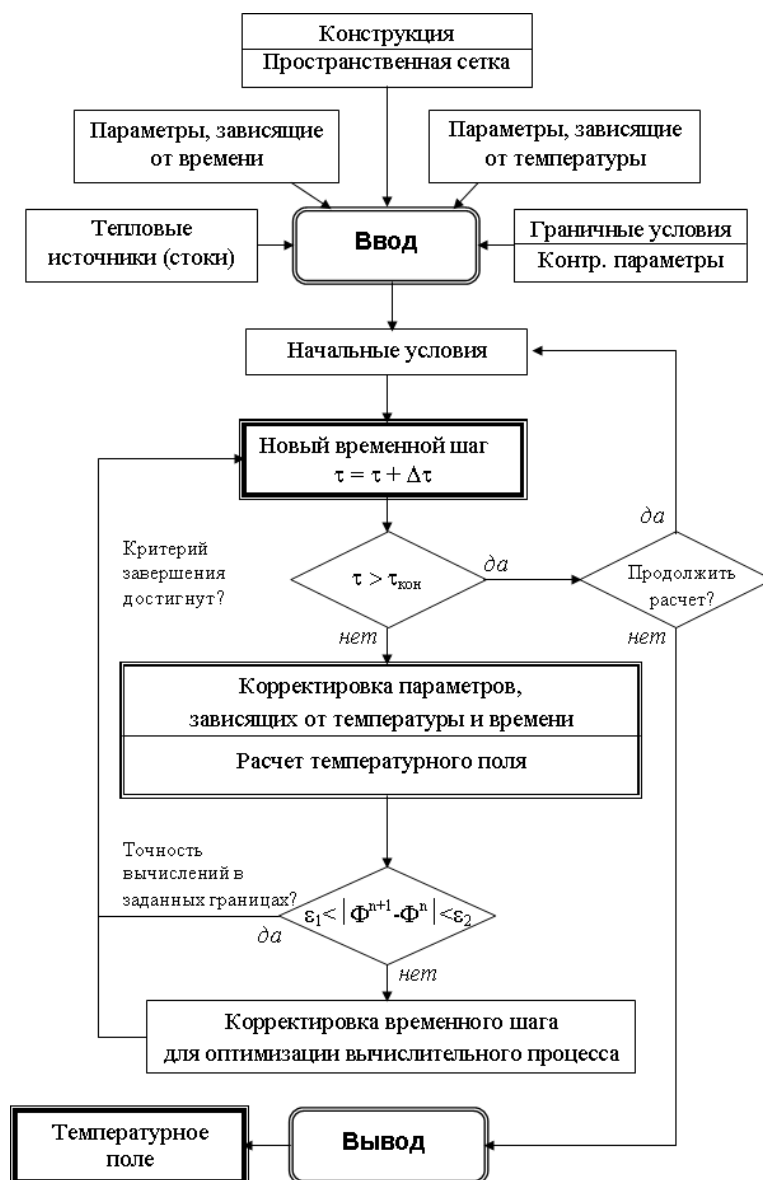


Рисунок 1. Блок-схема компьютерной программы «НТП»

Результатом расчета по программе «НТП» является температурное поле элемента оболочки здания в заданный момент времени.

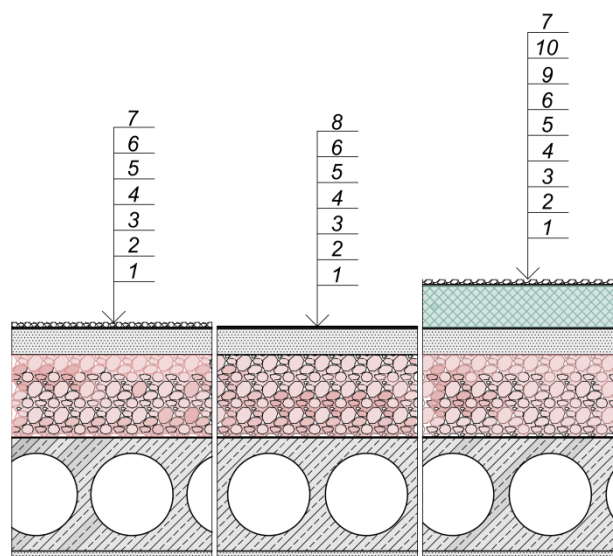
Компьютерная программа «НТП» включена в программно-вычислительный комплекс «Энергоэффективность и тепловая защита зданий» [13], имеет государственную регистрацию в Российской Федерации и была использована при проектировании ряда объектов жилищно-гражданского назначения.

### Постановка задачи

Разработанный метод использован для многофакторной оценки элемента оболочки в виде совмещенного неветилируемого покрытия эксплуатируемого общественного здания в г. Волгограде. Указанная конструкция состоит из железобетонных многпустотных плит толщиной 220 мм и оштукатурена с внутренней стороны цементно-песчаным раствором толщиной 20 мм. В качестве утеплителя использован слой керамзитового гравия толщиной 160–180 мм. Между утеплителем и плитами покрытия расположен пароизоляционный слой из пергамина толщиной 2 мм. По теплоизоляционному слою предусмотрена стяжка из цементно-песчаного раствора толщиной 50 мм. По стяжке располагается слой гидроизоляции из рубероида толщиной 3 мм. Схема ограждающей конструкции по базовому варианту, согласно проектному решению, приведена на рисунке 2, слева (вариант 1).

Для дополнительной теплозащиты конструкции рассмотрен вариант (рис. 2, в центре) с применением композиционного покрытия «керамические микросферы – связующее» по гидроизоляционному слою (вариант 2). Применение композиционного покрытия широко рекламируется производителем для повышения теплозащиты ограждающих конструкций. Композиционное покрытие, по данным производителя, состоит из полых либо сплошных керамических (или стеклянных) микросфер с характерным размером порядка 10...50 мкм, перемешанных с акриловой краской. После высыхания оно состоит из нескольких рядов микросфер, связанных тонкой акриловой пленкой.

Для оценки теплоизолирующего эффекта композиционного покрытия рассмотрен также широко применяемый на практике вариант конструкции (рис. 2, справа) с дополнительным утеплением базовой конструкции жесткими минераловатными плитами толщиной 80 мм (2×40 мм) и с гидроизоляционным слоем по утеплителю (вариант 3).



**Рисунок 2. Схема ограждающей конструкции: 1 – штукатурка; 2 – железобетонная плита; 3 – пароизоляция; 4 – теплоизоляция; 5 – стяжка; 6 – гидроизоляция; 7 – защитный слой; 8 – композиционное покрытие «керамические микросферы – связующее»; 9 – теплоизоляция (дополнительный слой); 10 – гидроизоляция (дополнительный слой)**

В расчете использованы теплофизические характеристики строительных материалов, приведенные в таблице 1.

**Таблица 1. Расчетные теплофизические характеристики строительных материалов ограждающей конструкции**

Материал слоя конструкции	Плотность материала $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоемкость $c$ , кДж/(кг·°С)	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·°С)
Цементно-песчаный раствор	1800	0,84	0,76
Железобетон	2500	0,84	1,92
Пергамин	600	1,68	0,17
Гравий керамзитовый	500	0,84	0,15
Рубероид	1400	1,68	0,27
Минераловатные плиты	180	0,84	0,045
Композиционное покрытие TC Ceramic (при 23 °С)		1,112	0,097

Указанные в таблице 1 расчетные теплофизические характеристики строительных материалов взяты из справочного приложения Т СП 50.13330.2012 и из сертифицированных данных производителя композиционного покрытия.

Оценка теплового режима ограждающей конструкции выполнена на основании результатов математического моделирования теплового режима по компьютерной программе «НТП» с учетом действующих нормативных документов.

Корниенко С.В. Многофакторная оценка теплового режима в элементах оболочки здания

## Математическое моделирование теплового режима покрытия

### Тепловой режим конструкции в холодный период года

Оценка теплозащитных свойств указанной конструкции наиболее точно может быть выполнена на основе приведенного сопротивления теплопередаче по результатам расчета температурных полей.

Математическое моделирование теплового режима конструкции в холодный период года выполнено при следующих граничных условиях:

- расчетная температура внутреннего воздуха  $t_{int} = 19\text{ °C}$  (табл. 3 ГОСТ 30494–2011);
- расчетная температура наружного воздуха  $t_{ext} = -22\text{ °C}$  (п. 3.1 СП 131.13330.2012);
- расчетный коэффициент теплообмена у внутренней поверхности  $\alpha_{si} = 8,7\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{°C})$  (СП 50.13330.2012, табл. 4);
- расчетный коэффициент теплообмена у наружной поверхности  $\alpha_{se} = 23\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{°C})$  (СП 50.13330.2012, табл. 6).

Тепловые источники в конструкции отсутствуют. Расчет выполнен при автоматическом выборе временного шага, обеспечивающем заданную точность вычислений, до установления стационарного теплового режима конструкции. Результатом расчета является температурное поле конструкции.

По температурному полю определяется средняя температура на внутренней поверхности конструкции  $t_{si}^{av}$  и вычисляется средняя плотность теплового потока через конструкцию  $q_{av}$  по формуле:

$$q_{av} = \alpha_{si} (t_{int} - t_{si}^{av})$$

Расчетное приведенное сопротивление теплопередаче конструкции  $R_{tot}$  определяется по формуле:

$$R_{tot} = \frac{t_{int} - t_{ext}}{q_{av}}$$

Результаты расчета теплового режима конструкции в холодный период года, полученные на основании температурного поля, приведены в таблице 2.

**Таблица 2. Результаты расчета теплового режима конструкции в холодный период года**

Наименование показателя	Обозначение, ед. изм.	Значения показателя для вариантов конструкции			
		1	2	3	
Температура на внутренней поверхности:	минимальная (в зоне ребер плиты)	$t_{si}^{min}, \text{°C}$	15,28	15,3	17,16
	максимальная (в зоне пустот плиты)	$t_{si}^{max}, \text{°C}$	16,09	16,12	17,64
	средняя	$t_{si}^{av}, \text{°C}$	15,9	15,9	17,5
Средняя плотность теплового потока	$q_{av}, \text{Вт}/\text{м}^2$	27,1	26,9	12,9	
Расчетное приведенное сопротивление теплопередаче	$R_{tot}, \text{м}^2\cdot\text{°C}/\text{Вт}$	1,51	1,52	3,17	

Анализ данных таблицы 2 показывает, что применение композиционного покрытия «керамические микросферы – связующее» в холодный период года имеет нулевой теплоизолирующий эффект, практически не меняя температурное поле, потери теплоты и теплозащитные свойства конструкции. Как и в базовом варианте, уровень теплозащиты конструкции ниже нормируемого ( $R_{req} = 3,1\text{ м}^2\cdot\text{°C}/\text{Вт}$ ). Применение варианта утепления базовой конструкции минераловатными плитами позволяет повысить теплозащитные свойства конструкции в холодный период года до уровня норм.

Результаты численного моделирования подтверждаются данными теоретических исследований на основе математической модели для расчета теплозащитных свойств композиционного покрытия, результатами экспериментальных исследований, полученных в климатической камере, и результатами натурных наблюдений [34]. При определенных условиях теплоизоляционный эффект от применения композиционного покрытия может отсутствовать или даже инвертироваться, т. е. наличие покрытия способно приводить к возрастанию теплового потока с поверхности [34].

Корниенко С.В. Многофакторная оценка теплового режима в элементах оболочки здания



### Тепловой режим конструкции в теплый период года

Математическое моделирование нестационарного теплового режима конструкции в теплый период года выполнено при следующих граничных условиях:

- расчетная температура внутреннего воздуха  $t_{int} = 24$  °С (таблица 3 ГОСТ 30494–2011);
- температура наружного воздуха  $t_{ext}(\tau)$  принята по данным измерений (табл. 3);
- плотность теплового потока от солнечного излучения  $q_{\lambda}(\tau)$  на горизонтальную поверхность принята по обобщенным данным многолетних натуральных измерений (табл. 4);
- расчетный коэффициент теплообмена у внутренней поверхности  $\alpha_{si} = 8,7$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С) (СП 50.13330.2012, табл. 4);
- расчетный коэффициент теплообмена у наружной поверхности  $\alpha_{se} = 32,2$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С) вычислен по формуле (6.9) СП 50.13330.2012 при средней скорости ветра в июле 5,2 м/с (согласно п. 4.1 СП 131.13330.2012).

**Таблица 3. Температура наружного воздуха  $t_{ext}(\tau)$  в июле**

Часы суток до полудня	Температура, °С	Часы суток после полудня	Температура, °С
1	22,9	13	33
2	24	14	32,8
3	25,2	15	32,5
4	26,4	16	30,2
5	27,5	17	27,9
6	28,7	18	25,6
7	29,9	19	24,1
8	31,1	20	22,7
9	32,3	21	21,2
10	32,6	22	21,4
11	33	23	21,5
12	33,3	24	21,7

**Таблица 4. Плотность теплового потока  $q_{\lambda}(\tau)$  на горизонтальную поверхность от солнечного излучения в июле**

Часы суток до полудня	Плотность теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>	Часы суток после полудня	Плотность теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>
0–1	—	12–13	865
1–2	—	13–14	814
2–3	—	14–15	719
3–4	—	15–16	607
4–5	29	16–17	455
5–6	146	17–18	293
6–7	293	18–19	146
7–8	455	19–20	29
8–9	607	20–21	—
9–10	719	21–22	—
10–11	814	22–23	—
11–12	865	23–24	—

Начальная температура конструкции 24 °С. Коэффициенты поглощения солнечной радиации материалами конструкции приняты по вариантам расчета: 1 – 0,9; 2 – 0,17 (по данным производителя); 3 – 0,65. Тепловые источники в конструкции отсутствуют. Расчет выполнен при автоматическом выборе временного шага с заданной точностью вычислений.

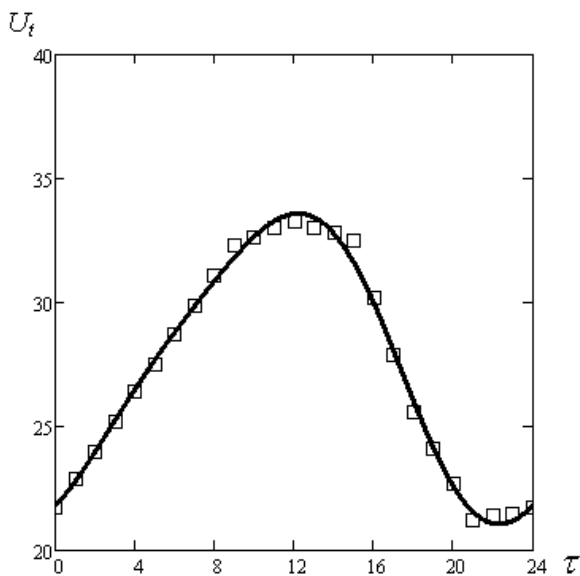
Статистическая обработка климатических данных (табл. 3 и 4) выполнена методом наименьших квадратов конечными рядами Фурье. Установлено, что зависимость температуры наружного воздуха от времени  $U_{\lambda}(\tau)$  имеет следующий вид:

$$U_t(\tau) = \frac{a_0}{2} + \sum_{l=1}^2 [a_l \cos(\omega_l \tau) + b_l \sin(\omega_l \tau)] \quad (8)$$

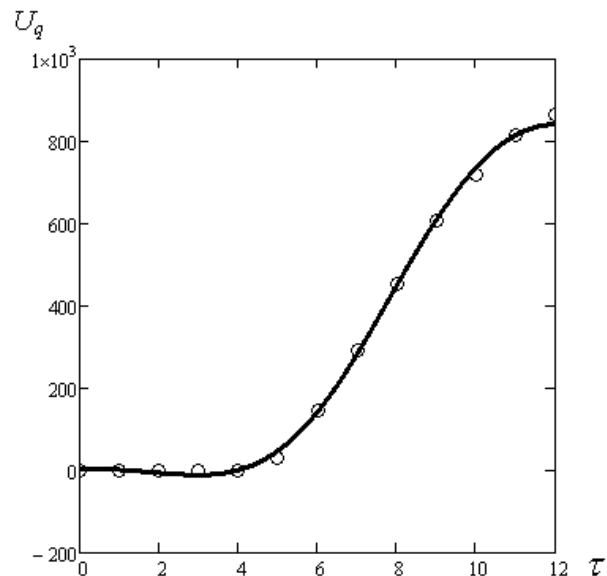
где  $a_0 = 55,116$ ;  $a_l, b_l$  — коэффициенты Фурье ( $a_1 = -5,884$ ,  $b_1 = 1,379$ ;  $a_2 = 0,138$ ,  $b_2 = 0,871$ );  $\omega_l$  — круговая частота  $l$ -й гармоники ( $\omega_1 = \pi/12$ ,  $\omega_2 = \pi/6$ ).

Максимальная относительная ошибка на узлах равна 1,7 %.

График  $U_t(\tau)$ , построенный на основании формулы (8), приведен на рисунке 3. Маркерами показаны результаты измерений (см. табл. 3).



**Рисунок 3. График зависимости температуры наружного воздуха от времени ( $U_t$ , °C;  $\tau$ , ч)**



**Рисунок 4. График зависимости плотности теплового потока от времени ( $U_q$ , Вт/м²;  $\tau$ , ч (до полудня))**

Аналогично определяется зависимость плотности теплового потока от времени  $U_q(\tau)$ :

$$U_q(\tau) = \frac{a_0}{2} + \sum_{l=1}^4 [a_l \cos(\omega_l \tau) + b_l \sin(\omega_l \tau)] \quad (9)$$

где  $a_0 = 582,168$ ;  $a_1 = -428,162$ ,  $b_1 = 2,989 \cdot 10^{-7}$ ;  $a_2 = 140,348$ ,  $b_2 = -6,982 \cdot 10^{-8}$ ;  $a_3 = 10,052$ ,  $b_3 = -1,559 \cdot 10^{-7}$ ;  $a_4 = -8,332$ ,  $b_4 = 1,024 \cdot 10^{-7}$ ;  $\omega_1 = \pi/12$ ,  $\omega_2 = \pi/6$ ,  $\omega_3 = \pi/4$ ,  $\omega_4 = \pi/3$ .

Максимальная относительная ошибка на узлах равна 2,4 %.

График  $U_q(\tau)$ , построенный на основании формулы (9), приведен на рисунке 4. Маркерами показаны результаты измерений (см. табл. 4).

Полученные данные использованы в расчете температурного поля конструкции.

Результаты расчета показывают, что для всех вариантов конструкции периодический тепловой режим, соответствующий указанным выше граничным условиям, отмечается примерно спустя 5 суток от начала расчета.

Графики зависимости температуры от времени в различных сечениях конструкции, построенные на основании обработки расчетных данных кубическими сплайн-функциями, приведены на рисунках 5–7.



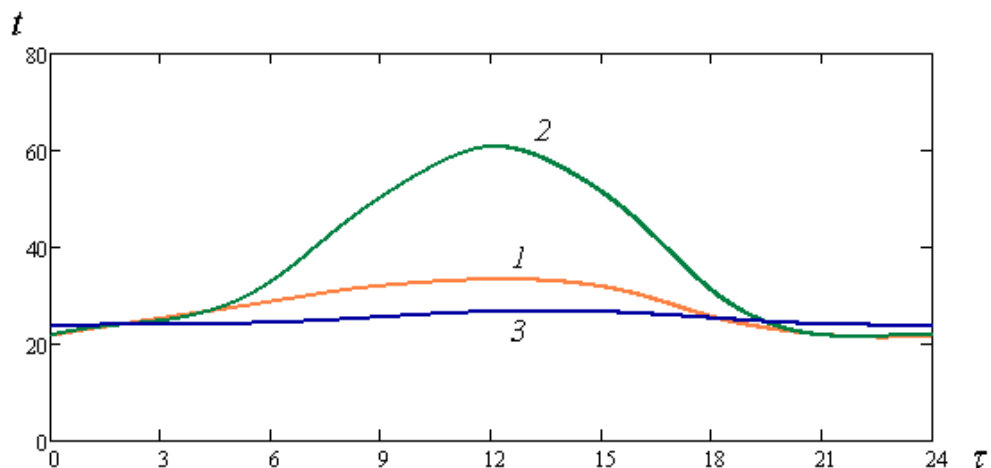


Рисунок 5. График зависимости температуры от времени по первому варианту ( $t$ , °С;  $\tau$ , ч):  
1 – наружный воздух; 2 – наружная поверхность; 3 – внутренняя поверхность

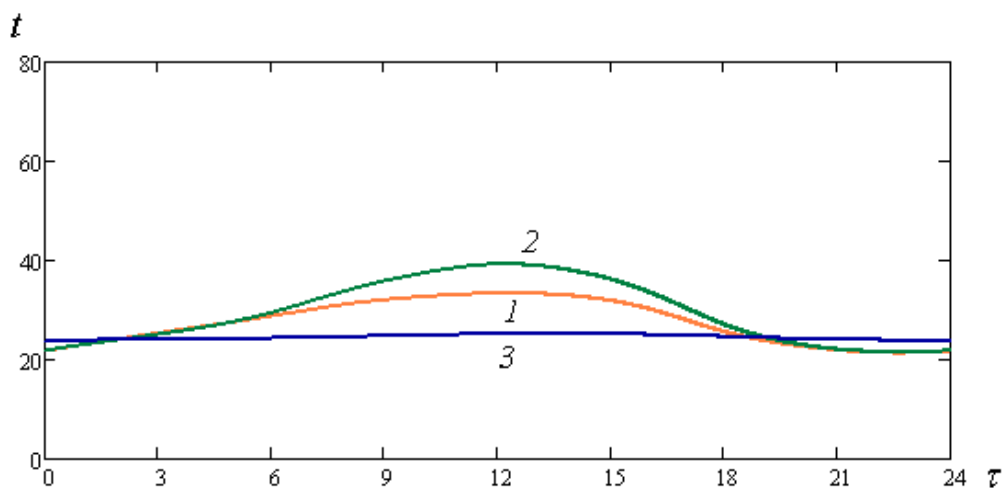


Рисунок 6. График зависимости температуры от времени по второму варианту ( $t$ , °С;  $\tau$ , ч):  
1 – наружный воздух; 2 – наружная поверхность; 3 – внутренняя поверхность

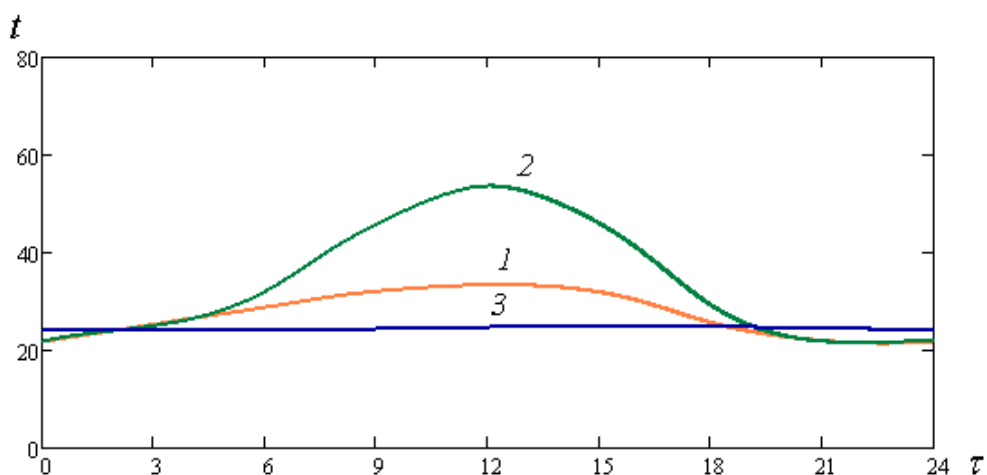


Рисунок 7. График зависимости температуры от времени по третьему варианту ( $t$ , °С;  $\tau$ , ч):  
1 – наружный воздух; 2 – наружная поверхность; 3 – внутренняя поверхность

Расчетом установлено, что максимум температуры на наружной поверхности конструкции практически совпадает по времени с максимумом температуры наружного воздуха (рис. 5–7).

Для базового варианта конструкции (рис. 5) максимальная температура на наружной поверхности равна 60,8 °С, на внутренней поверхности – 26,8 °С, запаздывание температурного колебания составляет 2 ч.

Для варианта с применением композиционного покрытия «керамические микросферы – связующее» максимальная температура на наружной поверхности равна 39,18 °С, на внутренней поверхности – 25,16 °С, запаздывание температурного колебания составляет 2 ч (рис. 6). Резкое снижение температуры на наружной поверхности конструкции объясняется низкой поглотательной способностью солнечного излучения композиционного покрытия.

При использовании дополнительного утепления базовой конструкции жесткими минераловатными плитами максимальная температура на наружной поверхности равна 53,5 °С, на внутренней поверхности – 24,9 °С, запаздывание температурного колебания составляет 4 ч (рис. 7). Таким образом, применение дополнительного утепления базовой конструкции минераловатными плитами приводит к большему снижению температуры на внутренней поверхности конструкции и запаздыванию температурного колебания, что повышает тепловой комфорт в помещении.

Среднесуточная температура на наружной поверхности конструкции  $t_{se}^{av}$  определяется по формуле:

$$t_{se}^{av} = \frac{1}{24} \int_0^{24} t_{se} d\zeta.$$

Среднесуточная температура на внутренней поверхности конструкции  $t_{si}^{av}$  определяется по формуле:

$$t_{si}^{av} = \frac{1}{24} \int_0^{24} t_{si} d\zeta.$$

Амплитуда колебаний температуры на наружной поверхности конструкции  $A_{se}$  определяется по формуле:

$$A_{se} = t_{se}^{\max} - t_{se}^{av},$$

где  $t_{se}^{\max}$  – максимальная температура на наружной поверхности конструкции.

Амплитуда колебаний температуры на внутренней поверхности конструкции  $A_{si}$  определяется по формуле:

$$A_{si} = t_{si}^{\max} - t_{si}^{av},$$

где  $t_{si}^{\max}$  – максимальная температура на внутренней поверхности конструкции.

Показатель затухания колебаний температуры в конструкции  $\nu$  определяется по формуле:

$$\nu = \frac{A_{se}}{A_{si}}.$$

Плотность теплового потока  $q_{si}(\tau)$ , поступающего в помещение, определяется по формуле:

$$q_{si} = \alpha_{si} (t_{int} - t_{si}).$$

Суммарное количество теплоты, поступающее в помещение за сутки, определяется по формуле:

$$q_{sum} = \int_0^{24} q_{si} d\zeta.$$

Результаты расчета теплового режима конструкции в теплый период года, полученные на основании температурного поля, приведены в таблице 5.

**Таблица 5. Результаты расчета теплового режима конструкции в теплый период года**

Наименование показателя	Обозначение, ед. изм.	Значения показателя для вариантов конструкции		
		1	2	3
Температура на наружной поверхности: максимальная средняя	$t_{se}^{max}, ^\circ\text{C}$	60,8	39,18	53,5
	$t_{se}^{av}, ^\circ\text{C}$	37	29,6	34,4
Температура на внутренней поверхности: максимальная средняя	$t_{si}^{max}, ^\circ\text{C}$	26,8	25,16	24,9
	$t_{si}^{av}, ^\circ\text{C}$	25,1	24,4	24,4
Запаздывание температурных колебаний	$\varepsilon, \text{ч}$	2	2	4
Амплитуда колебаний температуры: на наружной поверхности на внутренней поверхности	$A_{se}, ^\circ\text{C}$	23,8	9,6	19,1
	$A_{si}, ^\circ\text{C}$	1,75	0,71	0,51
Показатель затухания колебаний температуры в конструкции	$\nu$	13,7	13,5	37,6
Суммарное количество теплоты, поступающее в помещение за сутки	$q_{sum}, \text{Вт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{сут})$	225	99,6	82,1

Согласно СП 50.13330.2012 оценка ограждающих конструкций на теплоустойчивость производится по амплитуде колебаний температуры на внутренней поверхности. Критерием теплоустойчивости конструкции является выполнение следующего условия:

$$A_{si}^{des} \leq A_{si}^{req},$$

где  $A_{si}^{des}$ ,  $A_{si}^{req}$  – соответственно расчетная и нормируемая амплитуда колебаний температуры на внутренней поверхности конструкции.

Согласно п. 6.1 СП 50.13330.2012 нормируемая амплитуда колебаний температуры на внутренней поверхности ограждающих конструкций равна 2,21 °С при расчетной температуре наружного воздуха в теплый период года, равной 23,9 °С (СП 131.13330.2012). Сравнивая расчетные значения амплитуды колебаний температуры на внутренней поверхности (табл. 5) с нормируемым значением, можно отметить, что все рассмотренные варианты конструкции отвечают нормативному требованию по теплоустойчивости. Наилучший показатель по теплоустойчивости имеет конструкция с дополнительным утеплением минераловатными плитами. Сравнивая указанные варианты конструкций по суммарному количеству теплоты, поступающему в помещение за сутки, можно отметить, что вариант 3 (при прочих равных условиях) обеспечивает минимальные тепlopоступления в теплый период года.

### Заключение

На основе разработанного автором метода многофакторной оценки теплового режима в элементах оболочки здания выполнена оценка теплоизолирующего эффекта от применения композиционного покрытия «керамические микросферы – связующее» в качестве дополнительной тепловой защиты совмещенного невентилируемого покрытия здания. Показано, что применение композиционного покрытия имеет практически нулевой теплоизолирующий эффект и не обеспечивает нормируемый уровень тепловой защиты ограждающей конструкции в холодный период года. В то же время применение традиционного варианта утепления базовой конструкции минераловатными плитами позволяет повысить теплoзащитные свойства конструкции до уровня норм. Такой вариант утепления дает наилучший показатель и по теплоустойчивости, обеспечивая минимальные тепlopоступления в теплый период года.

## Литература

1. Luikov A.V., Shashkov A.G., Vasiliev L.L., Fraiman Yu.E. Thermal conductivity of porous systems // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1968. Vol. 11. Issue 2. Pp. 117–140.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
3. Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло- и массообмена. М.–Л.: Государственное энергетическое издательство, 1961. 681 с.
4. Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. Л.: Энергия, 1971. 296 с.
5. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. М.: Стройиздат, 1979. 248 с.
6. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Либроком, 2009. 784 с.
7. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. 194 с.
8. Патанкар С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 312 с.
9. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. М.: Мир, 1983. 512 с.
10. Matrosov Yu.A., Butovsky I.N., Childs K.V. Results of comparing solutions of calculation problems of enclosing structures with thermal bridges by Soviet and American methods // *Energy and Buildings*. 1990. Vol. 14. Issue 4. Pp. 303–311.
11. Opitz M.W., Norford L.K., Matrosov Yu.A., Butovsky I.N. Energy consumption and conservation in the Russian apartment building stock // *Energy and Buildings*. 1997. Vol. 25. Issue 1. Pp. 75–92.
12. Соловьев А.К., Туснина О.А. Сравнительный теплотехнический расчет систем верхнего естественного освещения (зенитные фонари и полые трубчатые световоды) // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. №2(46). С. 24–35.
13. Корниенко С.В. Повышение энергоэффективности зданий за счет снижения теплопотерь через краевые зоны ограждающих конструкций // *Academia. Архитектура и строительство*. 2010. №3. С. 348–351.
14. Туснина О.А., Емельянов А.А., Туснина В.М. Теплотехнические свойства различных конструктивных систем навесных вентилируемых фасадов // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. №8(43). С. 54–63.
15. Blocken B., Defraeye T., Derome D., Carmeliet J. High-resolution CFD simulations for forced convective heat transfer coefficients at the facade of a low-rise building // *Building and Environment*. 2009. Vol. 44. Issue 12. Pp. 2396–2412.
16. Luo C., Moghtaderi B., Page A. Modelling of wall heat transfer using modified conduction transfer function, finite volume and complex Fourier analysis methods // *Energy and Buildings*. 2010. Vol. 42. Issue 5. Pp. 605–617.
17. Chen D. Dynamic three-dimensional heat transfer calculation for uninsulated slab-on-ground constructions // *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 60. Pp. 420–428.
18. Корниенко С.В. Тестирование метода расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций на результатах натурных измерений параметров микроклимата помещений // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. №2(28). С. 18–23.
19. Martinho N., Lopes A., Gameiro da Silva M. Evaluation of errors on the CFD computation of air flow and heat transfer around the human body // *Building and Environment*. 2012. Vol. 58. Pp. 58–69.
20. Ватин Н.И., Немова Д.В., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Влияние уровня тепловой защиты ограждающих конструкций на величину потерь тепловой энергии в здании // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. №8(34). С. 4–14.
21. Горшков А.С., Ватин Н.И. Свойства стеновых конструкций из ячеистобетонных изделий автоклавного твердения на полиуретановом клею // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. №5(40). С. 5–19.
22. Орлович Р.Б., Горшков А.С., Зимин С.С. Применение камней с высокой пустотностью в облицовочном слое многослойных стен // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. №8(43). С. 14–23.
23. Корниенко С.В. Расчетно-экспериментальный контроль энергосбережения зданий // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. №8(43). С. 24–30.

24. Петросова Д.В., Кузьменко Н.М., Петросов Д.В. Экспериментальное исследование теплового режима легкой ограждающей конструкции в натуральных условиях // Инженерно-строительный журнал. 2013. №8(43). С. 31–37.
25. Liu Y., Wang D., Liu J. Study on heat transfer process for in-slab heating floor // Building and Environment. 2012. Vol. 54. Pp. 77–85.
26. Simões N., Tadeu A. Transient conduction and convection heat transfer across a multi-layer floor subjected to multiple heat sources // Building and Environment. 2006. Vol. 41. Issue 10. Pp. 1299–1310.
27. Корниенко С.В. Комплексная оценка теплозащиты ограждающих конструкций оболочки здания // Инженерно-строительный журнал. 2012. №7(33). С. 43–49.
28. Brás A., Gonçalves F., Faustino P. Cork-based mortars for thermal bridges correction in a dwelling: Thermal performance and cost evaluation // Energy and Buildings. 2014. Vol. 72. Pp. 296–308.
29. Berggren B., Wall M. Calculation of thermal bridges in (Nordic) building envelopes – Risk of performance failure due to inconsistent use of methodology // Energy and Buildings. 2013. Vol. 65. Pp. 331–339.
30. Ge H., McClung V.R., Zhang S. Impact of balcony thermal bridges on the overall thermal performance of multi-unit residential buildings: A case study // Energy and Buildings. 2013. Vol. 60. Pp. 163–173.
31. Mao G., Johannesson G. Dynamic calculation of thermal bridges // Energy and Buildings. 1997. Vol. 26. Issue 3. Pp. 233–240.
32. Martin K., Erkoreka A., Flores I., Odriozola M., Sala J.M. Problems in the calculation of thermal bridges in dynamic conditions // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. Issues 2–3. Pp. 529–535.
33. Tadeu A., Simões I., Simões N., Prata J. Simulation of dynamic linear thermal bridges using a boundary element method model in the frequency domain // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. Issue 12. Pp. 3685–3695.
34. Герман М.Л., Гринчук П.С. Математическая модель для расчета теплозащитных свойств композиционного покрытия «керамические микросферы–связующее» // Инженерно-физический журнал. 2002. Т. 75. №6. С. 43–53.
35. Корниенко С.В. Метод решения трехмерной задачи совместного нестационарного тепло- и влагопереноса для ограждающих конструкций зданий // Известия вузов. Строительство. 2006. №2. С. 108–110.

*Сергей Валерьевич Корниенко, г. Волгоград, Россия*  
*Тел. моб.: +7(988)4912459; эл. почта: svkorn2009@yandex.ru*

© Корниенко С.В., 2014

doi: 10.5862/MCE.52.4

## Multifactorial forecast of thermal behavior in building envelope elements

**S.V. Korniyenko***Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, Volgograd, Russia  
+79884912459; e-mail: svkorn2009@yandex.ru*

### Key words

building thermal performance; building envelope element; calculation method; software; mathematical simulation; “ceramic microspheres – binder” composite coating

### Abstract

Thermal performance of buildings is the key aspect of energy saving and energy efficiency enhancement. The thermal behavior of a building is formed under the influence of many factors. The complexity of the process of heat transfer through envelope structures makes the problem of multifactorial assessment of thermal behavior in building envelope elements crucial.

This paper presents an assessment of the heat-insulating effect gained from the use of the “ceramic microspheres – binder” composite coating as additional thermal protection of the combined unventilated covering of a building. This multifactorial assessment is based on the calculation method of measuring thermal behavior in building envelope elements developed by the author.

It was shown that the application of the composite coating has almost a zero heat-insulating effect and does not provide a normalized level of thermal performance of the enclosing structure during the cold season. In the meantime, the application of mineral wool slabs as the traditional heat insulation for the basic construction allows enhancing thermal properties of the construction to a specified value. Such heat insulation is best for the building thermal capacity, providing a minimum heat gain during the warm season.

### References

1. Luikov A.V., Shashkov A.G., Vasiliev L.L., Fraiman Yu.E. Thermal conductivity of porous systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1968. Vol. 11. Issue 2. Pp. 117–140.
2. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Thermal conductivity theory]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967. 600 p. (rus)
3. Ekkert E.R., Dreyk R.M. *Teoriya teplo- i massoobmena* [Heat and Mass Transfer Theory]. Moscow-Leningrad: Gosudarstvennoye energeticheskoye izdatelstvo, 1961. 681 p. (rus)
4. Sperrou E.M., Sess R.D. *Teploobmen izlucheniym* [Radiation Heat Transfer]. Leningrad: Energiya, 1971. 296 p. (rus)
5. Bogoslovskiy V.N. *Teplovoy rezhim zdaniya* [Building Thermal Comfort]. Moscow: Stroyizdat, 1979. 248 p. (rus)
6. Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N. *Vychislitelnaya teploperedacha* [Computational Heat Transfer]. Moscow: Librokom, 2009. 784 p. (rus)
7. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M. *Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya teplovoy effektivnosti zdaniy* [Mathematical models of thermal conditions in buildings]. Moscow: AVOK-PRESS, 2002. 194 p. (rus)
8. Patankar S.V. *Chislennoye resheniye zadach teploprovodnosti i konvektivnogo teploobmena pri techenii v kanalakh* [Numerical Heat Transfer and Fluid Flow]. Moscow: Izdatelstvo MEI, 2003. 312 p. (rus)
9. Kreyt F., Blek U. *Osnovy teploperedachi* [Basic Heat Transfer]. Moscow: Mir, 1983. 512 p. (rus)
10. Matrosov Yu.A., Butovsky I.N., Childs K.V. Results of comparing solutions of calculation problems of enclosing structures with thermal bridges by Soviet and American methods. *Energy and Buildings*. 1990. Vol. 14. Issue 4. Pp. 303–311.
11. Opitz M.W., Norford L.K., Matrosov Yu.A., Butovsky I.N. Energy consumption and conservation in the Russian apartment building stock. *Energy and Buildings*. 1997. Vol. 25. Issue 1. Pp. 75–92.
12. Solovyev A.K., Tusnina O.A. *Sravnitelnyy teplotekhnicheskyy raschet sistem verkhnego yestestvennogo osveshcheniya (zenitnyye fonari i polye trubchatyye svetovody)* [A comparative thermal analysis of system



- of the upper daylight (clerestory and daylight guidance system)]. *Magazine of Civil Engineering*. 2014. No. 2(46). Pp. 24–35. (rus)
13. Korniyenko S.V. Povysheniye energoeffektivnosti zdaniy za schet snizheniya teplopoter cherez krayevyyezony ograzhdayushchikh konstruksiy [Improving building energy efficiency by reducing heat loss through the boundary zone walling]. *Academia. Arkhitektura i stroitelstvo*. 2010. No.3. Pp. 348–351. (rus)
  14. Tushina O.A., Yemelyanov A.A., Tushina V.M. Teplotekhnicheskiye svoystva razlichnykh konstruktivnykh sistem navesnykh ventiliruyemykh fasadov [Thermal insulation properties of various ventilated facade systems]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 8(43). Pp. 54–63. (rus)
  15. Blocken B., Defraeye T., Derome D., Carmeliet J. High-resolution CFD simulations for forced convective heat transfer coefficients at the facade of a low-rise building. *Building and Environment*. 2009. Vol. 44. Issue 12. Pp. 2396–2412.
  16. Luo C., Moghtaderi B., Page A. Modelling of wall heat transfer using modified conduction transfer function, finite volume and complex Fourier analysis methods. *Energy and Buildings*. 2010. Vol. 42. Issue 5. Pp. 605–617.
  17. Chen D. Dynamic three-dimensional heat transfer calculation for uninsulated slab-on-ground constructions. *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 60. Pp. 420–428.
  18. Korniyenko S.V. Testirovaniye metoda rascheta temperaturno-vlazhnostnogo rezhima ograzhdayushchikh konstruksiy na rezultatakh naturnykh izmereniy parametrov mikroklimata pomeshcheniy [Testing of calculation method of the enclosing structures temperature-humidity conditions on the results of indoor climate in-situ measurements]. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 2(28). Pp. 18–23. (rus)
  19. Martinho N., Lopes A., Gameiro da Silva M. Evaluation of errors on the CFD computation of air flow and heat transfer around the human body. *Building and Environment*. 2012. Vol. 58. Pp. 58–69.
  20. Vatin N.I., Nemova D.V., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S. Vliyaniye urovnya teplovoy zashchity ograzhdayushchikh konstruksiy na velichinu poter teplovoy energii v zdanii [Influence of building envelope thermal protection on heat loss value in the building]. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 8(34). Pp. 4–14. (rus)
  21. Gorshkov A.S., Vatin N.I. Svoystva stenovykh konstruksiy iz yacheistobetonnykh izdeliy avtoklavnogo tverdeniya na poliuretánovom kleyu [Properties of the wall structures made of autoclaved cellular concrete products on the polyurethane foam adhesive]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 5(40). Pp. 5–19. (rus)
  22. Orlovich R.B., Gorshkov A.S., Zimin S.S. Primeneniye kamney s vysokoy pustotnostyu v oblitsovochnom sloye mnogoslownykh sten [Application of stones of high voidage in the facing layer of the multilayer walls]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 8(43). Pp. 14–23. (rus)
  23. Korniyenko S.V. Raschetno-eksperimentalnyy kontrol energosberezheniya zdaniy [Settlement and experimental control of energy saving for buildings]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 8(43). Pp. 24–30. (rus)
  24. Petrosova D.V., Kuzmenko N.M., Petrosov D.V. Eksperimentalnoye issledovaniye teplovogo rezhima legkoy ograzhdayushchey konstruksii v naturnykh usloviyakh [A field experimental investigation of the thermal regime of lightweight building envelope construction]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 8(43). Pp. 31–37. (rus)
  25. Liu Y., Wang D., Liu J. Study on heat transfer process for in-slab heating floor. *Building and Environment*. 2012. Vol. 54. Pp. 77–85.
  26. Simões N., Tadeu A. Transient conduction and convection heat transfer across a multi-layer floor subjected to multiple heat sources. *Building and Environment*. 2006. Vol. 41. Issue 10. Pp. 1299–1310.
  27. Korniyenko S.V. Kompleksnaya otsenka teplozashchity ograzhdayushchikh konstruksiy obolochki zdaniya [The complex assessment of a thermal performance of the building envelope]. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 7(33). Pp. 43–49. (rus)
  28. Brás A., Gonçalves F., Faustino P. Cork-based mortars for thermal bridges correction in a dwelling: Thermal performance and cost evaluation. *Energy and Buildings*. 2014. Vol. 72. Pp. 296–308.
  29. Berggren B., Wall M. Calculation of thermal bridges in (Nordic) building envelopes – Risk of performance failure due to inconsistent use of methodology. *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 65. Pp. 331–339.
  30. Ge H., McClung V.R., Zhang S. Impact of balcony thermal bridges on the overall thermal performance of multi-unit residential buildings: A case study. *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 60. Pp. 163–173.
  31. Mao G., Johannesson G. Dynamic calculation of thermal bridges. *Energy and Buildings*. 1997. Vol. 26. Issue 3. Pp. 233–240.
  32. Martin K., Erkoreka A., Flores I., Odriozola M., Sala J.M. Problems in the calculation of thermal bridges in dynamic conditions. *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43. Issues 2–3. Pp. 529–535.

33. Tadeu A., Simões I., Simões N., Prata J. Simulation of dynamic linear thermal bridges using a boundary element method model in the frequency domain. *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43. Issue 12. Pp. 3685–3695.
34. German M.L., Grinchuk P.S. Matematicheskaya model dlya rascheta teplozashchitnykh svoystv kompozitsionnogo pokrytiya «keramicheskiye mikrosfery–svyazuyushcheye» [Mathematical model for thermal characteristics analysis of composite coating “Ceramic microspheres–adhesive”]. *Engineering and Physics Journal*. 2002. Vol. 75. No. 6. Pp. 43–53. (rus)
35. Korniyenko S.V. Metod resheniya trekhmernoy zadachi sovmestnogo nestatsionarnogo teplo- i vlagoperenosa dlya ograzhdayushchikh konstruktsiy zdaniy [Method for solving the three-dimensional problem of unsteady heat and sharing moisture transfer for building envelopes]. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2006. No. 2. Pp. 108–110. (rus)

**Full text of this article in Russian: pp. 25–37**