

УДК 697:536.2

## Локальные значения параметров теплообмена на внутренних поверхностях ограждений

А. Э. Захаревич<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016  
Belarusian National Technical University, 2016

**Реферат.** На основе численного моделирования процессов переноса теплоты и массы в отапливаемом помещении выполнено исследование локальных характеристик теплообмена на внутренних поверхностях ограждений в условиях естественной конвекции. Анализ осуществлен на основании распределений температуры поверхности, конвективного коэффициента теплообмена, удельного конвективного и удельного радиационного потоков. Разработанная двумерная физико-математическая модель учитывает сложный сопряженный теплообмен в ограждающих конструкциях и в свободном пространстве помещений, влияние вида отопительного прибора на процессы переноса. Учитывается конструктивная неоднородность ограждений и заполнения световых проемов. Модель также содержит уравнения радиационного теплообмена между поверхностями внутри помещения, оконными стеклами и окружающей средой. Представлен анализ локальных характеристик теплообмена на внутренних поверхностях окна, нижней части наружной стены, расположенной под окном, и пола. Рассмотрены четыре вида нагревателей: радиатор, конвектор, подоконная отопительная панель и напольное отопление. Выявлена существенная пространственная неоднородность распределения параметров теплообмена на внутренних поверхностях ограждений, обусловленная видом отопительного прибора. Наиболее близкий характер распределений соответствующих величин на поверхности ограждений наблюдается в условиях применения радиатора и конвектора, что определяется значительным сходством полей параметров микроклимата в помещении в этих вариантах. Обнаружены характерные особенности формирования локальных параметров теплообмена на внутренних поверхностях рассмотренных ограждающих конструкций.

**Ключевые слова:** численное моделирование, теплообмен, помещение, ограждающая конструкция, отопительный прибор

**Для цитирования:** Захаревич, А. Э. Локальные значения параметров теплообмена на внутренних поверхностях ограждений / А. Э. Захаревич // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 1. С. 56–64

## Local Values of Heat Transfer Parameters on the Interior Surfaces of the Building Envelope

A. E. Zakharevich<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The investigation of local heat-transfer characteristics on the interior surfaces of the building envelope under natural convection conditions was carried out on the basis of numerical simulation of heat and mass transfer processes in the heated room. The analysis was based on the

---

### Адрес для переписки

Захаревич Алексей Эдуардович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 150,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 265-97-29  
tg\_v\_fes@bntu.by

### Address for correspondence

Zakharevich Aleksey E.  
Belarusian National Technical University  
150 Nezavisimosti Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 265-97-29  
tg\_v\_fes@bntu.by

---

distributions of surface temperature, convective heat-transfer coefficient, convective heat flux and radiative heat flux. The developed two-dimensional physical and mathematical model takes into account the complex conjugated heat transfer in the building envelopes and indoor free spaces, the influence of heater type on the transfer processes. Constructional irregularities of the structures and the windows are considered. The model also contains the equations of radiative heat transfer between indoor surfaces, window panes and outdoor environment. The publication presents the analysis of the local heat-transfer characteristics on the interior surfaces of the window, the lower part of the external wall located beneath the window, and the floor. Four types of heaters are considered: radiator, convector radiator, wall-radiator under the window and the floor heating. The study reveals considerable heat-transfer parameters spatial nonuniformity on the interior surfaces of the building envelope conditioned by the type of the heat emitter in use. The radiator and the convector radiator use shows the closest distribution character of the corresponding values on the building envelope surface, the fact predicated upon considerable similarity of the indoor-microclimate parameter fields in these variants. The characteristic features of the heat-transfer local parameters forming on the interior surfaces of the considered enclosing structures were discovered.

**Keywords:** numerical simulation, heat transfer, room, building envelope, heat emitter

**For citation:** Zakharevich A. E. (2016) Local Values of Heat Transfer Parameters on the Interior Surfaces of the Building Envelope. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (1), 56–64 (in Russian)

## Введение

Ограждения наряду с системами отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха участвуют в формировании параметров микроклимата в помещениях. Исследования многих видных ученых, в том числе К. Ф. Фокина [1], В. Н. Богословского [2], В. Г. Гагарина [3] и Ю. А. Табунщикова [4], посвящены изучению тепломассообмена внутри строительных конструкций и на их поверхностях. Достаточно значимые изменения требований к теплозащитным свойствам ограждений, произошедшие в последнее время, позволяют утверждать, что исследование процессов переноса в ограждениях и на их поверхностях представляет научный и практический интерес.

В разработанной двумерной физико-математической модели, приведенной в [5], учтена сопряженность различных видов переноса теплоты в ограждениях и в свободном пространстве отапливаемых помещений, влияние на эти процессы вида отопительного прибора. Учитываются конструктивная неоднородность ограждений и наличие световых проемов. Разработанная программа включает в себя блок расчета радиационного теплообмена между поверхностями внутри помещения, оконными стеклами и окружающей средой. Степень соответствия двумерной модели реальным трехмерным процессам проверена в экспериментах.

В настоящее время исследователи широко применяют математическое моделирование как непосредственно для анализа теплообмена ограждений [6–8], так и для определения энергопотребления проектируемых [9, 10], а также существующих зданий, например в рамках энергоаудита.

В данной публикации представлены результаты численного моделирования процессов теплообмена в отапливаемом помещении в условиях естественной конвекции.

## Описание задачи

Расчетная область представляет собой вертикальный разрез помещения посередине окна. Помещение расположено на нижнем этаже здания, сни-

зу – подвал с температурой 5 °С. В смежных помещениях задана температура воздуха 20 °С. Высота помещения составляет 2,5 м, длина – 6,0 м.

Материал наружного и внутреннего слоев наружной стеновой панели – железобетон, в качестве теплоизоляционного слоя принят пенополистирол. Оконная рама и подоконник – из древесины. Камеры стеклопакета представлены материалом с эквивалентными теплофизическими характеристиками. Материал перекрытий и внутренней стены – железобетон. Для исключения влияния на конечный результат амплитуды суточных колебаний температура наружного воздуха задана постоянной – минус 24 °С.

Публикация [11] позволяет ознакомиться с характером расчетных полей параметров микроклимата в отапливаемом помещении при использовании различных видов приборов.

Цель работы – проанализировать отличия в условиях теплообмена на внутренних поверхностях ограждений при использовании различных видов отопительных приборов. Рассмотрены четыре вида нагревателей: радиатор, конвектор, подоконная отопительная панель и напольное отопление. Нагрузка приборов задана в соответствии с тепловым балансом, определенным по традиционной методике.

Для исследования особенностей теплообмена использовали графики распределения следующих величин: температуры поверхности  $T$ , °С; конвективного коэффициента теплообмена  $\alpha_k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К); удельного конвективного потока  $q_k$ , Вт/м<sup>2</sup>; удельного радиационного потока  $q_r$ , Вт/м<sup>2</sup>.

В разработанной модели местное значение  $\alpha_k$  определяли на основе локальных характеристик потока. Величину  $q_k$  рассчитывали по местным значениям  $\alpha_k$  и разности температур поверхности и омывающего воздуха,  $q_r$  находили с помощью метода сальдо [5].

Значения  $q_k$  и  $q_r$  являются положительными, если поверхность ограждения получает теплоту. В случае отдачи теплоты поверхностью ограждения данные величины принимают отрицательные значения.

### Результаты расчетов

Графики изменения исследуемых величин на внутренних поверхностях окна, нижней части наружной стены, расположенной под окном, и пола соответственно представлены на рис. 1–3. Величина  $H$  на вертикальных осях графиков – это расстояние от пола помещения до рассматриваемой точки на вертикальном ограждении. Параметр  $X$  на горизонтальных осях показывает расстояние от внутренней поверхности наружной стены до рассматриваемого места пола.

Проанализируем основные особенности пространственного распределения исследуемых параметров. На рис. 1 наблюдаются различия в интенсивности конвективного и радиационного теплообменов на поверхности остекления и поверхностях верхней и нижней частей оконной рамы. Деревянные элементы имеют более высокую температуру, чем поверхность стекла (рис. 1а). Значения удельного конвективного потока, поступающего на внутреннюю поверхность стекла, в полтора-два раза больше, чем на поверхности деревянных элементов рамы (рис. 1с).

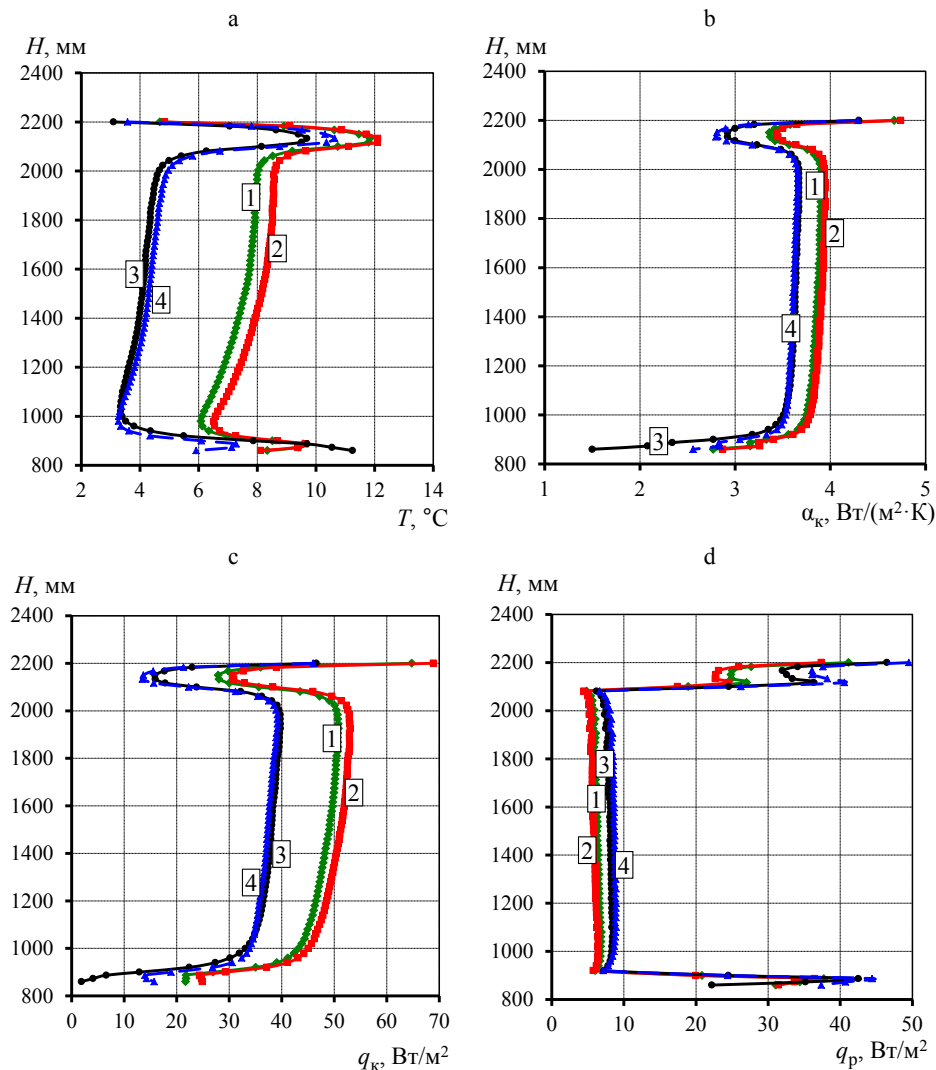


Рис. 1. Распределение параметров по внутренней поверхности окна:  
 а – температура  $T$ ; б – конвективный коэффициент теплообмена  $\alpha_k$ ;  
 с – удельный конвективный поток  $q_k$ ; д – удельный радиационный поток  $q_p$ ;  
 1 – радиатор; 2 – конвектор; 3 – подоконная панель; 4 – напольное отопление

Fig. 1. Parametrization over the inside window-surface:  
 а – temperature  $T$ ; б – convection heat-transfer coefficient  $\alpha_k$ ;  
 с – convective heat flux  $q_k$ ; д – radiative heat flux  $q_p$ ;  
 1 – radiator; 2 – convector radiator; 3 – wall-type radiator; 4 – floor heating

В соответствии с законами переноса теплового излучения пониженное значение температуры остекления должно было бы привести к более интенсивному поступлению радиационной теплоты на поверхность стекла, чем на поверхность деревянных элементов. Однако коэффициент поглощения остекления с селективным покрытием равен 0,1 (что в девять раз меньше, чем у деревянных переплетов). В итоге удельный радиационный поток, поглощаемый поверхностью остекления, в пять раз меньше, чем для деревянных элементов (рис. 1d).

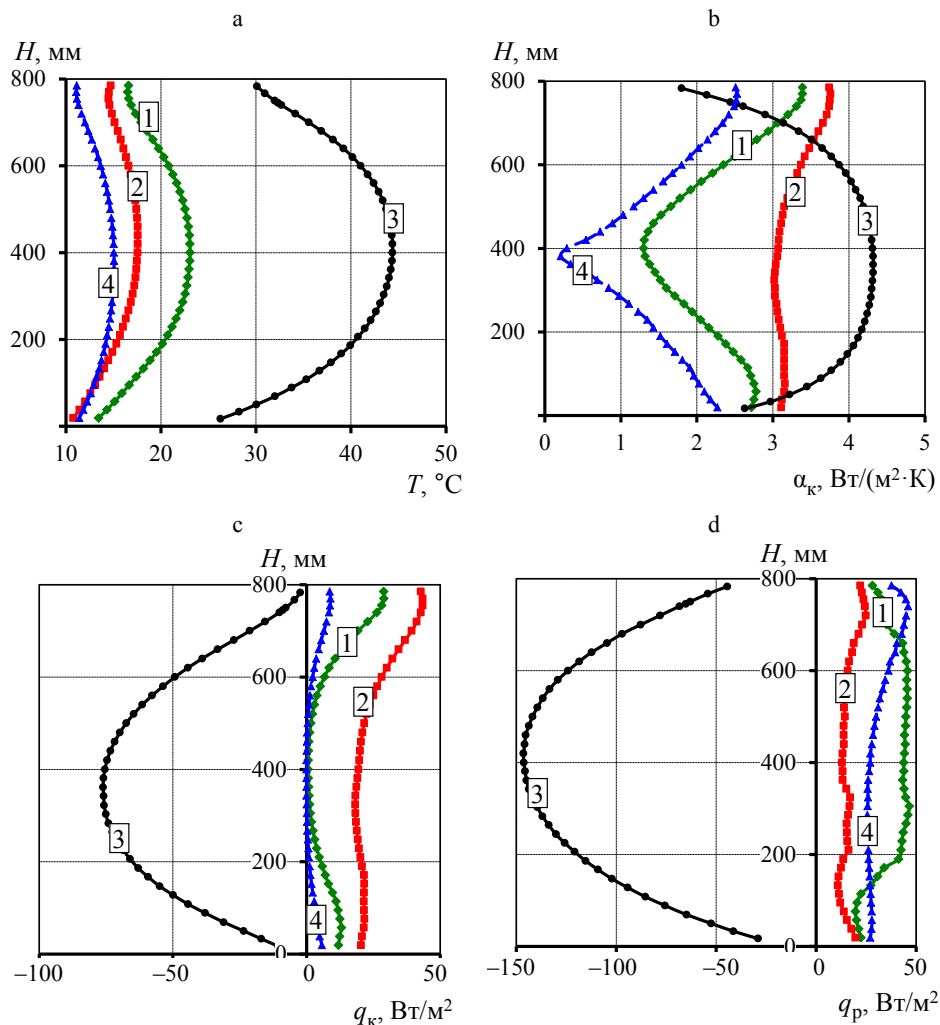


Рис. 2. Распределение параметров по внутренней поверхности наружной стены – нижней части, расположенной под окном (обозначения на рис. 1)

Fig. 2. Parametrization over the inner surface of the external wall – lower part under the window (notations in Fig. 1)

Наблюдается следующая особенность. Сверху оконный блок контактирует с железобетонным торцом стеновой панели, который представляет собой «мостик холода». По этой причине верхняя часть деревянной конструкции заполнения оконного проема (на стыке с панелью) имеет температуру более низкую, чем температура остекления. Снизу конструкция светопрозрачного ограждения также сопрягается с торцом панели, который оказывает аналогичное влияние на поле температур заполнения оконного проема. При использовании подоконной отопительной панели нижняя часть деревянной конструкции имеет более высокую температуру по сравнению с данными для других приборов, что связано с поступлением теплоты от нагревательных элементов, расположенных в нижней части наружной стены.

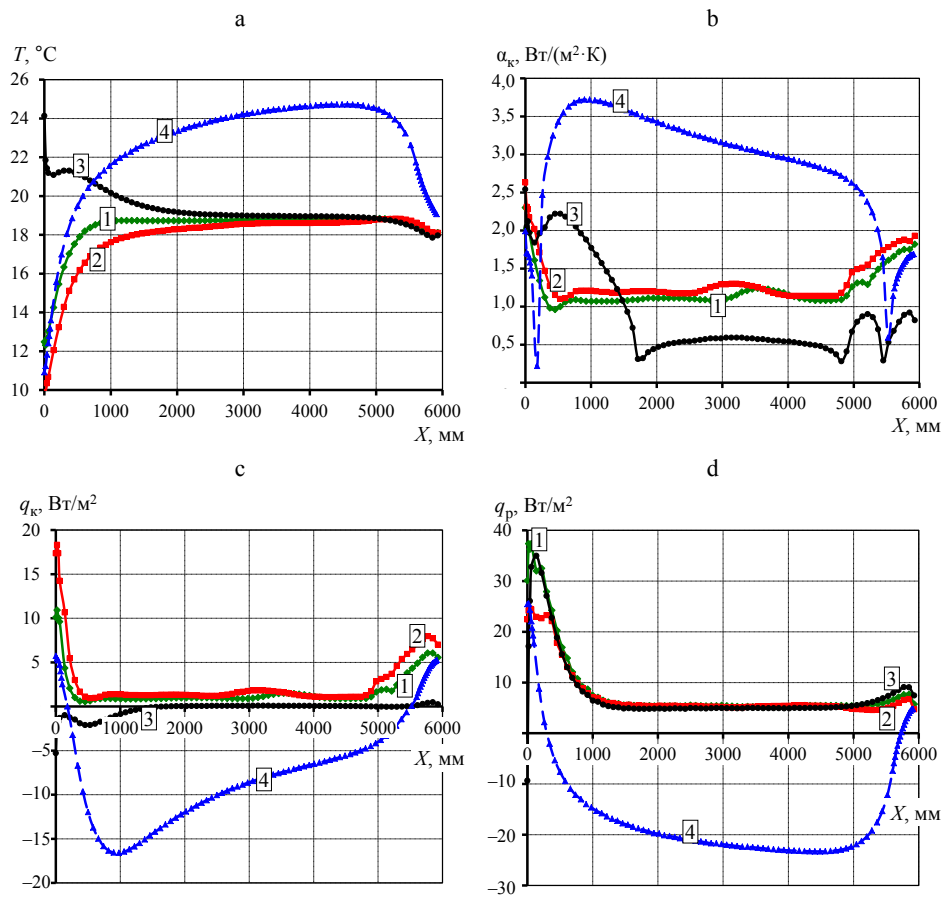


Рис. 3. Распределение параметров по поверхности пола над подвалом  
(обозначения на рис. 1)

Fig. 3. Parametrization over the floor surface atop the basement  
(notations in Fig. 1)

Воздух, контактируя с холодной поверхностью остекления, остывает и под действием гравитационных сил движется вниз. Вследствие такого направления движения воздуха температура внутренней поверхности стекла понижается в направлении сверху вниз почти на  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 1а, область от 2,0 до 1,0 м).

Распределения параметров, характеризующих теплообмен заполнения оконного проема для всех четырех видов приборов, имеют подобный характер. Основное отличие заключается в разном соотношении конвективной и лучистой долей в составе общего потока теплоты для вариантов с конвектором или радиатором и для вариантов с подоконным или напольным отоплением (рис. 1с, d).

Графики распределения температуры на поверхности нижней части наружной стены, расположенной под окном, при использовании рассматриваемых приборов обладают сходством (рис. 2а). Более низкие значения в верхней и нижней частях графиков связаны с охлаждающим действием теплопроводных железобетонных торцов стеновой панели.

Сравним особенности теплообмена поверхности наружной стены в районе отметки 0,4 м в вариантах с применением радиатора и напольного отопления. Поверхность нагревается за счет поступления лучистой теплоты, в то же время конвективный теплообмен практически отсутствует по причине приближения температуры поверхности к температуре омывающей воздушной среды (рис. 2с, d). При этом наблюдаются пониженные значения конвективного коэффициента теплообмена.

Высокая температура поверхности при использовании подоконной отопительной панели обуславливает более высокое значение конвективного коэффициента теплообмена для данного прибора (рис. 2b). Происходит интенсивный теплосъем с поверхности панели, к тому же теплоотдача излучением выше, чем конвективная теплоотдача.

Подобие распределений соответствующих величин на поверхности пола в условиях применения радиатора и конвектора (рис. 3) определяется значительным сходством полей распределения параметров микроклимата в этих вариантах. При использовании подоконной отопительной панели основное отличие условий теплообмена на поверхности пола наблюдается в области, примыкающей к наружной стене. В данном варианте теплота, выделяемая нагревательными элементами, вследствие теплопроводности ограждающих конструкций достигает перекрытия и конструкции пола, локально повышая его температуру (рис. 3а). Поэтому поверхность в пределах 1,5 м от наружной стены отдает теплоту за счет конвекции (рис. 3с). В расчетах с радиатором, конвектором и напольным отоплением поверхность пола возле наружной стены имеет пониженную температуру вследствие охлаждающего влияния стыка стеновых панелей.

Максимальное отличие полей распределения параметров микроклимата и соответственно графиков на рис. 3 наблюдается при использовании напольного отопления. Отопительные элементы расположены в конструкции пола от 0,1 до 5,6 м и обеспечивают равномерное выделение теплоты. Поскольку воздух движется вдоль поверхности пола от наружной стены в глубь помещения, то основной нагрев происходит при контакте с областью пола, прилегающей к наружному ограждению. По мере продвижения к внутренней стене воздух все более нагревается и теплоотдача поверхности теплого пола за счет конвекции уменьшается (рис. 3с). В условиях более низкого конвективного теплосъема с участков, расположенных дальше от окна, поверхность пола имеет в этих зонах более высокую температуру и соответственно повышенную теплоотдачу излучением (рис. 3а, d).

При использовании напольного отопления поверхность пола в зоне 0,2 м от наружной стены и в районе 0,5 м от внутренней стены усваивает теплоту, передаваемую воздушной средой помещения, что видно по данным, приведенным на рис. 3с.

## ВЫВОДЫ

1. Получены аналогичные результаты для соответствующих ограждений и приборов в случае расположения помещений на среднем и верхнем

этажах здания. Выявлены особенности формирования распределений локальных параметров теплообмена на внутренних поверхностях ограждающих конструкций, определяемые видом отопительного прибора, тепло-техническими характеристиками ограждений и условиями теплообмена с наружной стороны. Для исследованных условий коэффициент теплообмена, учитывающий как конвективный, так и радиационный перенос теплоты, составляет 2–4 Вт/(м<sup>2</sup>·К), что меньше нормативного значения  $\alpha_b = 8,7$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) [12].

2. При использовании радиатора и конвектора отмечается наиболее близкий характер распределений соответствующих величин на поверхности ограждений, что определяется значительным сходством полей распределения параметров микроклимата в помещении в этих вариантах. В вариантах с подоконной отопительной панелью и напольным отоплением принципиально отличаются распределения параметров на поверхности ограждений, в которых размещаются нагревательные элементы.

3. Получить наиболее достоверную и детальную картину распределения характерных величин (в частности, температуры на поверхностях ограждений) при минимальных затратах времени и средств можно только в случае использования численного моделирования на основе дифференциальных уравнений, отражающих взаимосвязанные процессы переноса в ограждающих конструкциях и в воздушном пространстве помещения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К. Ф. Фокин. – 4-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1973. 287 с.
2. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) / В. Н. Богословский. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1982. 415 с.
3. Гагарин, В. Г. Теория состояния и переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий / В. Г. Гагарин. М., 2000. 396 с.
4. Табунщиков, Ю. А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач. М.: АВОК-Пресс, 2002. 194 с.
5. Захаревич, А. Э. Особенности формирования микроклимата в многосветных пространствах / А. Э. Захаревич // Вестник МГСУ. 2011. № 7. С. 148–154.
6. Heat and Moisture Transport in Wooden Multi-Composite Panels. Dynamic Study of the Air Layer Impact on the Building Envelope Energetic Behavior / I. Traoré [et al.] // International Journal of Thermal Sciences. 2011. Vol. 50, No 11. P. 2290–2303.
7. High-Resolution CFD Simulations for Forced Convective Heat Transfer Coefficients at the Facade of a Low-Rise Building / B. Blocken [et al.] // Building and Environment. 2009. Vol. 44, No 12. P. 2396–2412.
8. Peeters, L. Internal Convective Heat Transfer Modeling: Critical Review and Discussion of Experimentally Derived Correlations / L. Peeters, I. Beausoleil-Morrison, A. Novoselac // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43, No 9. P. 2227–2239.
9. Review of External Convective Heat Transfer Coefficient Models in Building Energy Simulation Programs: Implementation and Uncertainty / M. Mirsadeghi [et al.] // Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 56, No 1–2. P. 134–151.
10. Different Methods for the Modelling of Thermal Bridges Into Energy Simulation Programs: Comparisons of Accuracy for Flat Heterogeneous Roofs in Italian Climates / F. Ascione [et al.] // Applied Energy. 2012. Vol. 97. P. 405–418.



11. Захаревич, А. Э. Особенности формирования микроклимата отапливаемых помещений / А. Э. Захаревич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2009. № 5. С. 73–85.
12. Захаревич, А. Э. Формирование параметров микроклимата в отапливаемых помещениях в условиях естественной конвекции / А. Э. Захаревич. Минск: БНТУ, 2012. 22 с.

Поступила 17.03.2015    Подписана в печать 20.05.2015    Опубликовано онлайн 29.01.2016

#### REFERENCES

1. Fokin K. F. (1973) *Construction Thermal Engineering of Enclosing Parts of the Buildings*. 4<sup>th</sup> ed. Moscow, Stroyizdat. 287 p. (in Russian).
2. Bogoslovskiy V. N. (1982) *Construction Thermal Physics (Thermophysical Principles of Heating, Ventilation and Air-Conditioning)*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Vysshaya Shkola. 415 p. (in Russian).
3. Gagarin V. G. (2000) *Teoriya Sostoianiya i Perenos Vlagi v Stroitelnykh Materialakh i Teplozashchitnye Svoystva Ograzhdayushchikh Konstruktsii Zdanii*. [Theory of Moisture State and Transfer in the Construction Materials and Heat-Shielding Properties of the Enclosing Structures]. Moscow. 396 p. (in Russian).
4. Tabunshchikov Yu. A., Brodach M. M. (2002) *Mathematical Modeling and Optimization of the Buildings Thermal Effectiveness*. Moscow, AVOK-Press. 194 p. (in Russian).
5. Zakharevich A. E. (2011) Peculiarities of Microclimate Forming in the Multi-Light Spaces. *Vestnik MGSU* [Herald of MGSU], 7, 148–154 (in Russian).
6. Traoré I., Lacroix D., Trovalet L., Jeandel G. (2011) Heat and Moisture Transport in Wooden Multi-Composite Panels. Dynamic Study of the Air Layer Impact on the Building Envelope Energetic Behavior. *International Journal of Thermal Sciences*, 50 (11), 2290–2303. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2011.05.020.
7. Blocken B., Defraeye T., Derome D., Carmeliet J. (2009) High-Resolution CFD Simulations for Forced Convective Heat Transfer Coefficients at the Facade of a Low-Rise Building. *Building and Environment*, 44 (12), 2396–2412. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.04.004.
8. Peeters L., Beausoleil-Morrison I., Novoselac A. (2011) Internal Convective Heat Transfer Modeling: Critical Review and Discussion of Experimentally Derived Correlations. *Energy and Buildings*, 43 (9), 2227–2239. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.05.002.
9. Mirsadeghi M., Cóstola D., Blocken B., Hensen J. L. M. (2013) Review of External Convective Heat Transfer Coefficient Models in Building Energy Simulation Programs: Implementation and Uncertainty. *Applied Thermal Engineering*, 56 (1–2), 134–151. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.03.003.
10. Ascione F., Bianco N., De Rossi F., Turni G., Vanoli G. P. (2012) Different Methods for the Modelling of Thermal Bridges Into Energy Simulation Programs: Comparisons of Accuracy for Flat Heterogeneous Roofs in Italian Climates. *Applied Energy*, 97, 405–418. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.01.022.
11. Zakharyevich A. E. (2009) Microclimate Forming Peculiarities of the Heated Spaces. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obединenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], 5, 73–85 (in Russian).
12. Zakharevich A. E. (2012) *Formirovaniye Parametrov Mikroklimate v Otaplivaemykh Pomeshcheniyakh v Usloviyakh Estestvennoy Konveksii* [Microclimate Parametric Configuration in Heated Spaces under the Conditions of Natural Convection]. Minsk: BNTU. 22 p. (in Russian).

Received: 17 March 2015

Accepted: 20 May 2015

Published online: 29 January 2016