

УДК 621.74/519.2

Влияние отражательной способности экранов на процесс теплопередачи в ограждающих конструкциях

В. Д. Сизов¹⁾, Л. В. Нестеров¹⁾, В. М. Копко¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. Проведен анализ вариантов расположения теплоизоляционных слоев по отношению к несущим конструкциям наружных ограждений, показаны основные преимущества и недостатки трех вариантов. Отмечено, что с теплотехнической точки зрения предпочтителен вариант утепления с наружной стороны. Однако при использовании в качестве теплоизоляционного слоя микромодулей, разделенных экранами из алюминиевой фольги, необходимо производить учет отражательной способности экранов, которая позволяет снизить лучистую составляющую в общей величине теплопередачи через ограждение и таким образом повысить сопротивление теплопередаче конструкции или при равенстве этих величин привести к снижению толщины теплоизоляционного слоя. Для расчета суммарной теплопередачи использовали известные данные, с помощью которых было доказано, что величина общего теплового потока снизилась в 1,4 раза, а сопротивление теплопередаче – на 1,76 м²·град./Вт. Это позволяет уменьшить толщину теплоизоляционного слоя (с учетом двух экранов) на 0,07 м. Расчеты показали, что учет отражательной способности экранирования дает возможность снизить расчетный тепловой поток, проходящий через ограждение. Это в свою очередь позволяет уменьшить термическое сопротивление конструкции и ее общую толщину на 70 мм за счет малой толщины теплоизоляции из микромодулей. В результате расчета влажностного режима установлено, что условия эксплуатации ограждения в зимний период являются вполне приемлемыми и реальной конденсации водяного пара в этот период наблюдаться не будет. Построены графики тепловлажностного режима наружных ограждений, из которых видно, что зоны конденсации не затрагивают слой утеплителя (микромодули), а зона конденсации при уменьшении толщины теплоизоляционного слоя образовывается лишь при «жестких» условиях наружной температуры холодного месяца. Уменьшенная до 230 мм толщина стеновой конструкции позволит использовать «старый» парк форм при заводском изготовлении панелей с одновременной экономией энергоресурсов при тепловой обработке.

Ключевые слова: отражательная способность экранов, теплопередача, ограждающие конструкции, теплоизоляционные слои

Для цитирования: Сизов, В. Д. Влияние отражательной способности экранов на процесс теплопередачи в ограждающих конструкциях / В. Д. Сизов, Л. В. Нестеров, В. М. Копко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 1. С. 46–55

Адрес для переписки

Копко Виктор Михайлович
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

Kopko Viktor M.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-97-29
tg_v_fes@bntu.by

Effect of the Screens Radiant Reflectance on Thermal Transport Process in the Cladding Structures

V. D. Sizov¹⁾, L. V. Nesterov¹⁾, V. M. Kopko¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article analyses variants of the heat insulating layers disposition in relation to the cladding load-carrying structures and demonstrates prime advantages and drawbacks of the three variants. The authors notice that from the heat-engineering viewpoint the variant with exterior side winterization is the most favourable. However, utilizing micromodules as heat-insulating layers screened with leafing aluminum makes it necessary to account for the screens reflecting power. It allows reducing the irradiating component in the combined value of thermal transport through the enclosure and consequently raises the structure thermal resistance or, with parity of these values, leads to lower thickness of the heat-insulating layer. The known data applied for calculating the total heat transmission helps demonstrate reduction of the general heat flux value by 1.4 times, and the heat transmission resistance by $1.76 \text{ m}^2 \cdot \text{deg./W}$. This allows reducing thickness of the heat-insulating layer (with regard of two screens) by 0.07 m. Computations illustrate the fact that account for the radiant reflectance of screening enables lowering the rated heat flux passing through the enclosure. Which again allows decreasing the structure thermal resistance and its general thickness (by 70 mm) at the expense of small thickness of the heat insulation of micromodules. The humidity regime calculations establish good acceptability of the enclosure service conditions in winter. The period will see no real water vapour condensation. The plotted diagrams of the cladding heat-and-humidity conditions demonstrate that condensation zones do not affect the layer of thermal insulation (micromodules). And the condensation zone with reduction of the heat-insulating layer appears only during 'severe' outside temperature conditions of a cold month. Reduced to 230 mm thickness of the wall construction allows utilizing 'old' stock of forms with prefabricated panels in parallel with energy saving during thermal treatment.

Keywords: radiant reflectance of the screens, thermal transport, cladding structures, heat-insulating layers

For citation: Sizov V. D., Nesterov L. V., Kopko V. M. (2016) Effect of the Screens Radiant Reflectance on Thermal Transport Process in the Cladding Structures. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (1), 46–55 (in Russian)

В настоящее время существуют три основные системы расположения теплоизоляционных слоев по отношению к ограждающим конструкциям: размещение с наружной стороны, внутренней стороны и внутри конструкции. Наиболее распространены системы наружного утепления стен и покрытий зданий. К преимуществам такого утепления можно отнести то, что зона возможной конденсации водяных паров выносится за пределы несущей стены – в утеплитель. Паропроницаемые теплоизоляционные материалы, используемые для этого, не препятствуют испарению и удалению влаги из конструкции в наружную среду, что способствует снижению влажности материала и увеличивает срок эксплуатации конструкции в целом. Теплоизоляция повышает среднюю температуру несущей конструкции. Устройство теплоизоляции снаружи защищает конструкцию ограждения от переменного замораживания и оттаивания, выравнивает температурные

колебания ее массива, что также увеличивает долговечность несущей конструкции.

Однако следует иметь в виду, что плоскость возможной конденсации водяного пара может попасть внутрь слоя утеплителя, что неизбежно приведет к повышению его влажности. Этого можно избежать применением утеплителей с высокой паропроницаемостью, благодаря чему водяной пар удаляется из утеплителя наружу. Наружный теплоизоляционный слой приходится защищать как от увлажнения атмосферными осадками, так и от механического воздействия прочным, но паропроницаемым покрытием.

Способ утепления стен слоем теплоизоляции с внутренней стороны также имеет свои преимущества и недостатки. К преимуществам можно отнести удобство при выполнении работ (производство работы в любое время года), возможность применения самых современных технологий и обширного круга материалов (например, напыления пенополиуретана и т. п.), при этом полностью сохраняется наружная отделка дома. Недостатками являются:

- неизбежные потери полезной площади внутри зданий и возможное повышение влажности несущей конструкции, так как утеплитель снижает мощность теплового потока из помещений, понижая тем самым температуру в ограждении, что способствует увлажнению конструкции;
- дополнительное утепление должно быть прочно соединено с основным материалом, поскольку недостаточная адгезия материалов может привести к конденсации водяного пара в стыке соединения материалов.

Следовательно, если по каким-либо причинам единственно возможным вариантом утепления является размещение утеплителя изнутри, то следует принять необходимые (конструктивные и технологические) меры для защиты стены от воздействия влаги: установить со стороны помещения пароизоляцию, организовать эффективную вентиляцию в помещениях, обеспечить достаточную адгезию утеплителя и основного материала.

Таким образом, главные условия эффективной работы стеновой конструкции – теплоизоляция и предотвращение увлажнения ее в любых условиях. При размещении теплоизоляционных слоев внутри ограждающей конструкции возникает необходимость учитывать качественные характеристики теплоизоляции (теплопроводность, паропроницаемость и пр.) и ее влияние на эффективность работы ограждения в целом.

В [1] рассматривался вариант утепления наружного ограждения с помощью микромодулей, разделенных экранами из алюминиевой фольги. Однако при расчетах распределения температур не учитывалась отражательная способность экранов, которая позволяет значительно снизить лучистую составляющую в общем процессе теплопередачи через ограждающие конструкции. Вместе с тем такой учет можно произвести следующим образом.

При малой толщине замкнутой газовой прослойки, в качестве которой используются микромодули, при величине произведения $Gr \cdot Pr \leq 1000$,

когда перенос теплоты излучением является существенным по сравнению с теплопроводностью, величина суммарной теплопередачи (излучением и теплопроводностью) от поверхности с температурой T_1 к поверхности с температурой $T_2 < T_1$ может быть определена из следующего уравнения:

$$q_{\Sigma} = q_{\text{л}} + q_{\text{к}} = C_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] + \frac{\lambda_{\text{г}}}{\delta_{\text{г}}} (T_1 - T_2), \quad (1)$$

где $q_{\text{л}}$ – тепловой поток излучением; $q_{\text{к}}$ – тепловой поток теплопроводностью через прослойку; $C_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент излучения,

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} C_0; \quad C_0 – \text{излучательная способность, равная } 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град.}^4);$$

$\lambda_{\text{г}}$, $\delta_{\text{г}}$ – коэффициент теплопроводности и толщина газовой прослойки; $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ – степень черноты поверхностей прослойки, $\varepsilon_1 = 0,05$.

Для расчета суммарной теплопередачи воспользуемся следующими данными: температура наружного воздуха наиболее холодного месяца минус 6,9 °С, температура в слоях ограждения между размещенными микромодулями [1]: $t_1 = 17,04$ °С; $t_2 = -5,57$ °С, при этом толщина слоя составляла $\delta_{\text{г}} = 0,15$ м, а $\lambda_{\text{г}} = 0,025$ Вт/(м²·°С). Подставляя эти данные в (1), получим величину суммарной теплопередачи

$$q_{\Sigma} = 2,87 + 3,76 = 6,64 \text{ (Вт/м}^2\text{)}.$$

В инженерных расчетах для определения лучистой составляющей допустимо использование эмпирического выражения

$$q_{\text{л}} = \alpha_{\text{л}} (t_1 - t_2), \quad (2)$$

которое, не отражая физического смысла процесса, тем не менее дает истинный результат. Это связано с тем, что коэффициент, выведенный из основного уравнения теплового излучения, принимает вид

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{C_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2}. \quad (3)$$

При приведенных выше исходных данных $\alpha_{\text{л}} = 0,127$ Вт/(м²·К). Для относительно небольших значений $\Delta T = T_1 - T_2$ величину $\alpha_{\text{л}}$ можно определить по выражению [2]

$$\alpha_{\text{л}} = 4 \frac{C_{\text{пр}}}{100} \left(\frac{T}{100} \right)^3, \quad (4)$$

$$\text{где } T = \frac{T_1 + T_2}{2}.$$

Из (4) получаем $\alpha_{\text{л}} = 0,125 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Расхождение в результатах вычислений по формулам (3) и (4) небольшое ($\approx 1,5\%$), поэтому в дальнейшем будем использовать уравнение (4).

Сравним величину теплового потока, проходящего через воздушную прослойку в случае размещения в ней двух экранов из фольги. Для этого случая величина $C_{\text{пр}}$ [2–10] будет иметь вид

$$C_{\text{пр}} = \frac{C_0}{(n+1)2\left(\frac{1}{\varepsilon_3} - \frac{1}{2}\right)}, \quad (5)$$

где n – число экранов; ε_3 – степень черноты экрана.

С учетом экранирования радиационный тепловой поток $q_{\text{л}}^3 = 0,96 \text{ Вт}/\text{м}^2$, а по сравнению с отсутствием экранов он уменьшится в три раза. Таким образом, общий тепловой поток при наличии двух экранов из алюминиевой фольги с отражательной способностью $\varepsilon = 0,05$ составит

$$q_{\Sigma} = q_{\text{л}}^3 + q_{\text{п}} = 0,96 + 3,76 = 4,72 \text{ (Вт}/\text{м}^2\text{)},$$

т. е. меньше расчетного теплового потока при температуре наиболее холодного месяца $t_{\text{х.м}} = -6,9^\circ\text{C}$, который равен $q_{\text{рас}} = 6,029 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

При установке экранов между модулями величина эффективной теплопроводности за счет излучения $\lambda_{\text{л}}$, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, определяется по формуле [2]

$$\lambda_{\text{л}} = \frac{q\delta}{F(T_2 - T_1)} = \frac{\varepsilon_3 \sigma_0}{n(2 - \varepsilon_3)} (T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2), \quad (6)$$

где σ_0 – излучение абсолютно черного тела, равное $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град.}^4)$; n – число экранов; T_1, T_2 – температуры поверхностей, К.

В соответствии с формулой (6)

$$\lambda_{\text{л}} = \frac{0,05 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot (2 - 0,05)} \cdot (290,04 + 267,43) \cdot (290,04^2 + 267,43^2) = 0,063 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}).$$

Эффективное термическое сопротивление излучением микромодулей с двумя экранами составит

$$R_3 = \frac{\delta_{\text{г}}}{\lambda_{\text{л}}} = \frac{0,15}{0,063} = 2,38 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт)}.$$

Используя известное соотношение $R = \frac{t_1 - t_2}{q}$, можно определить температуру t_2 на внешней границе микромодулей с учетом экранов, которая при $q_{\Sigma} = 4,72 \text{ Вт}/\text{м}^2$ составит $t_2 = t_1 - Rq_{\Sigma} = 17,04 - 3,75 \cdot 4,72 = -0,66 (^\circ\text{C})$.

Таким образом, величина максимальной упругости водяного пара в плоскости VI (рис. 1) составит $E = 578$ Па, а действительное парциальное давление

$$e_{VI} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{оп}} R_{ox} = 1135 - \frac{1135 - 293,3}{15} \cdot 14 = 349,5 \text{ (Па)},$$

т. е. разница в давлениях стала больше $(578 - 349,5) > (380 - 349,5)$ и возможности пересечения линий парциальных и действительных упругостей водяного пара меньше.

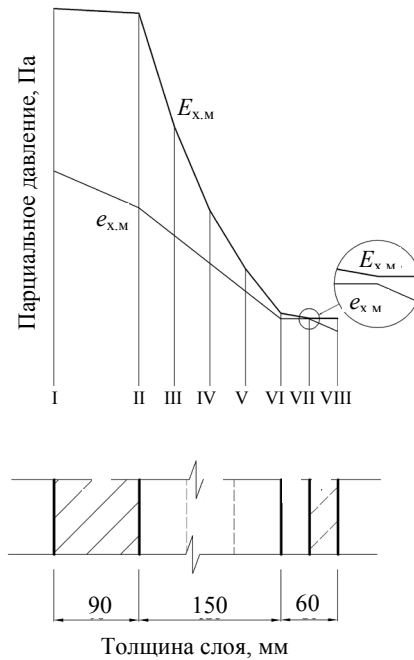


Рис. 1. Тепловлажностный режим наружного ограждения без учета влияния экранирования

Fig. 1. The cladding heat-and-humidity regime without account for the screening effect

Расчет аналогичных параметров был произведен и для температуры отопительного периода $t_H^{оп} = -1,6$ °C. В этом случае при $t_1 = 17,04$ °C, а $t_2 = -0,57$ °C по (1) получим

$$q_{\Sigma} = \frac{5,67}{\frac{1}{0,05} + \frac{1}{0,05} - 1} \cdot \left[\left(\frac{290,25}{100} \right)^4 - \left(\frac{272,43}{100} \right)^4 \right] + \frac{0,025}{0,15} \cdot (290,25 - 272,43) = 2,26 + 2,96 = 5,22 \text{ (Вт/м}^2\text{)}.$$

При этом

$$\frac{q_k}{q_p} = \frac{\frac{\lambda_r}{\delta_r}}{\alpha_n},$$

$$\text{или по (4) при } T = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{290,25 + 272,43}{2} = 281,34 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\alpha_n = 4 \cdot \frac{0,145}{100} \cdot \left(\frac{281,34}{100} \right)^3 = 0,128 \text{ (Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C))}.$$

При наличии между двумя плоскостями из алюминиевой фольги двух экранов из той же фольги радиационный тепловой поток должен уменьшиться до величины

$$q_n = \frac{C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{(n+1) \cdot 2 \cdot \left(\frac{1}{A} - \frac{1}{2} \right)} = \frac{5,67 \cdot 15,62}{(2+1) \cdot 2 \cdot \left(\frac{1}{0,05} - \frac{1}{2} \right)} = 0,756 \text{ (Вт/м}^2\text{)},$$

т. е. в $\frac{2,26}{0,756} = 2,989$ раза меньше расчетного.

Таким образом, общий тепловой поток при наличии двух экранов из алюминиевой фольги с отражательной способностью $\varepsilon = 0,05$ составит

$$q_\Sigma = q_n + q_p = 0,756 + 2,96 = 3,716 \text{ (Вт/м}^2\text{)}.$$

При этом тепловом потоке термическое сопротивление микромодулей

$$R = \frac{t_1 - t_2}{q} = \frac{17,04 + 5,57}{3,716} = 6,08 \text{ (м}^2\cdot\text{град./Вт)},$$

а без учета влияния экранов это же сопротивление

$$R = \frac{17,04 + 5,57}{5,229} = 4,32 \text{ (м}^2\cdot\text{град./Вт)}.$$

Таким образом, сопротивление теплопередаче можно уменьшить на величину

$$\Delta R = 6,08 - 4,32 = 1,76 \text{ (м}^2\cdot\text{град./Вт)},$$

что приведет к уменьшению толщины теплоизоляционного слоя из микромодулей с учетом двух экранов на величину

$$\delta = \lambda R = 0,04 \cdot 1,76 = 0,0704 \text{ (м)}.$$

Отсюда общая толщина конструкции может составить $\delta = 230$ мм вместо расчетной величины $\delta = 300$ мм.

Для иллюстрации построим графики тепловлажностного режима ограждений для двух вариантов ограждения (номера плоскостей I–VIII соответствуют иллюстрациям в [1]):

- без учета экранирования с толщиной микромодулей $\delta = 0,15$ м;
- с учетом влияния экранов и толщиной микромодулей $\delta = 0,08$ м.

Графики и расчеты приведены для условий наиболее холодного месяца: $t_n = t_{x,m} = -6,5$ °С; $\varphi = 86$ %. Данные для графиков на рис. 1, 2 влажностного режима наружной стены без учета и с учетом влияния экранирования представлены в табл. 1, 2.

Из рис. 2 видно, что во втором случае имеется небольшая зона конденсации. Однако необходимо иметь в виду, что расчеты проводили для «жестких» условий холодного месяца. Это не всегда выполняется; при небольшом повышении температуры наружного воздуха конденсация может не проявиться. Зона конденсации также не затрагивает слой утеплителя (микромодуля), что является положительным фактором.

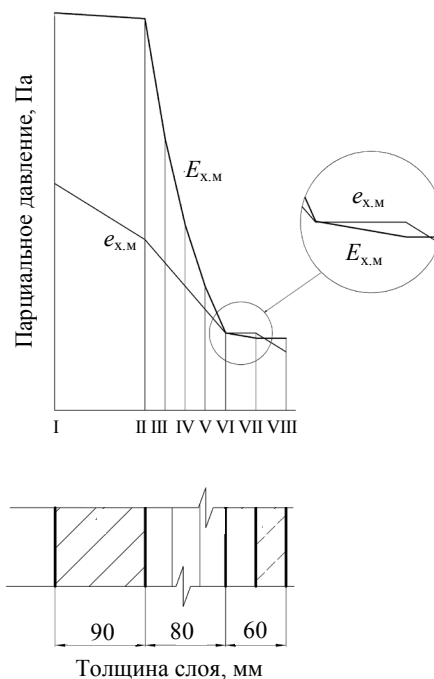


Рис. 2. Тепловлажностный режим наружного ограждения с учетом влияния экранирования

Fig. 2. The cladding heat-and-humidity regime with account for the screening effect

Таблица 1

Данные для построения графика влажностного режима наружной стены
(вариант без учета влияния экранирования)
Data for graphing the outer wall humidity regime
(variant without account for the screening effect)

| Расчетная температура воздуха | Определяемый параметр | Номер плоскости | | | | | | | |
|--------------------------------------|--|-----------------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| | | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII |
| $t_n = -6,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ | Температура t , $^\circ\text{C}$ | 17,40 | 17,17 | 11,52 | 5,87 | 0,23 | -5,42 | -6,26 | -6,30 |
| | Максимальное парциальное давление E , Па | 1987 | 1958 | 1360 | 927 | 621 | 387 | 361 | 360 |
| | Действительное парциальное давление e , Па | 1135,0 | 940,6 | | | | 357,4 | 357,4 | 292,0 |

Таблица 2

Данные для построения графика влажностного режима наружной стены
(вариант с учетом влияния экранирования)
Data for graphing the outer wall humidity regime
(variant with account for the screening effect)

| Расчетная температура воздуха | Определяемый параметр | Номер плоскости | | | | | | | |
|--------------------------------------|--|-----------------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| | | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII |
| $t_n = -6,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ | Температура t , $^\circ\text{C}$ | 17,40 | 17,17 | 11,52 | 5,87 | 0,23 | -5,42 | -6,26 | -6,30 |
| | Максимальное парциальное давление E , Па | 1987 | 1958 | 1360 | 927 | 621 | 387 | 361 | 360 |
| | Действительное парциальное давление e , Па | 1135,0 | 854,0 | | | | 385,6 | 385,6 | 292,0 |

ВЫВОДЫ

1. Расчеты показали, что экранирование снижает тепловой поток через ограждение в целом за счет повышения его термического сопротивления.
2. Радиационный поток теплоты через микромодуль дает возможность уменьшить общую толщину конструкции ограждения за счет снижения толщины микромодуля до 80 мм, что в свою очередь позволит использовать «старый» парк форм при заводском изготовлении изделий.
3. Уменьшение толщины конструкции ограждения дает возможность снизить энергозатраты на тепловую обработку и одновременно сократить срок этой технологической операции на заводе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сизов, В. Д. Использование теплоизоляционных слоев из микромодулей в новых конструкциях стеновых панелей / В. Д. Сизов, Л. В. Нестеров, В. М. Копко // Наука и техника. 2014. № 5. С. 54–60.
2. Ключников, А. Д. Теплопередача излучением в огнетехнических установках (инженерные решения задач) / А. Д. Ключников, Г. П. Иванцов. М.: Энергия, 1970. 400 с.
3. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-43–2006* (02250). Введ. 01.07.2007. Минск: Минстройархитектуры, 2015. 4 с.
4. Протасевич, А. М. Строительная теплофизика ограждающих конструкций зданий и сооружений / А. М. Протасевич. Минск: Вышэйш. шк., 2015. 239 с.

5. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К. Ф. Фокин; под ред. Ю. А. Табунщикова, В. Г. Гагарина. 5-е изд., испр. и пересмотр. М.: АВОК-Пресс, 2006. 256 с.
6. Тепло- и массообмен: в 2 ч. Ч. 1 / Б. М. Хрусталева [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука. М.: БНТУ, 2007. 607 с.
7. Тепло- и массообмен: в 2 ч. Ч. 2 / Б. М. Хрусталева [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука. М.: БНТУ, 2009. 273 с.
8. Elsner, N. Grundlagen der Technischen Thermodynamik / N. Elsner // Berlin: Akademie Verlag, 1974. 660 p.
9. Несенчук, А. П. Моделирование процессов тепломассопереноса в системах очистки искусственных горючих газов от CO₂ / А. П. Несенчук, В. М. Копко, Т. В. Рыжова // Литье и металлургия. 2001. № 1. С. 83–86.
10. Несенчук, А. П. Уточненная численная модель тепло- и массопереноса в термопсевдоожиженном гравитационном потоке системы очистки искусственных горючих газов от диоксида углерода / А. П. Несенчук, В. М. Копко, Т. В. Рыжова // Литье и металлургия. 2001. № 3. С. 83–85.

Поступила 24.06.2015 Подписана в печать 20.08.2015 Опубликовано онлайн 29.01.2015

REFERENCES

1. Sizov V. D., Nesterov L. V., Kopko V. M. (2014) Application of the Heat Insulation Layers of Micromodules in New Designs of the Wall Panels. *Nauka i Tekhnika* [Science & Technique], 5, 54–60 (in Russian).
2. Kluchnikov A. D., Ivantsov G. P. (1970) *Radiative Heat Transfer in the Fire Installations (Engineering Solutions of the Problems)*. Moscow, Energy. 400 p. (in Russian).
3. ТКР 45-2.04-43–2006* (02250). Construction Heat Engineering. Construction Norms and Regulations. Minsk, Minstroyarchitecture, 2015. 4 p. (in Russian).
4. Protasevich A. M. (2015) *Construction Thermophysics of the Buildings and Structures Envelopes*. Minsk, Vysheishaya Shkola. 239 p. (in Russian).
5. Fokin K. F., Tabunshchikov Yu. A., Gagarin V. G. (2006) *Construction Heat Engineering of Enclosing Parts of the Buildings*. 5th ed. Moscow, AVOK-Press. 256 p. (in Russian).
6. Khroustalev B. M., Nesenchuk A. P., Timoshpolskii V. I., Akelev V. D., Sednin V. A., Kopko V. M., Nerezko A. V. (2007) *Heat and Mass Transfer. P. 1*. Minsk: BNTU. 607 p. (in Russian).
7. Khroustalev B. M., Nesenchuk A. P., Akelev V. D., Sednin V. A., Kopko V. M., Timoshpolskii V. I., Sednin A. V., Nerezko A. V. (2009) *Heat and Mass Transfer. P. 2*. Minsk: BNTU. 273 p. (in Russian).
8. Elsner N. (1974) *Grundlagen der Technischen Thermodynamik* [Fundamentals of Engineering Thermodynamics]. Berlin, Akademie Verlag. 660 p. (German).
9. Nesenchuk A. P., Kopko V. M., Ryzhova T. V. (2001) Heat-and-Mass Transport Processes Simulation in the Artificial Inflammable Gases Cleaning Systems from CO₂. *Lite i Metallurgiya* [Foundry and Metallurgy], 1, 83–86 (in Russian).
10. Nesenchuk A. P., Kopko V. M., Ryzhova T. V. (2001) Amended Numerical Model of Heat-and-Mass Transport in the Thermo-Fluidized Gravitational Flow of the Artificial Inflammable Gases Cleaning System from Carbon Dioxide. *Lite i Metallurgiya* [Foundry and Metallurgy], 3, 83–85 (in Russian).

Received: 24 June 2015

Accepted: 20 August 2015

Published online: 29 January 2016