

## Эффективная многослойная стеновая панель

Канд. техн. наук, доц. В. Д. Сизов<sup>1)</sup>, А. В. Павловская<sup>1)</sup>

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

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** Выполнен комплексный анализ многослойной стеновой панели. Исследован теплоизоляционный слой, толщина которого влияет как на размеры ограждающей конструкции, так и на теплозащитную эффективность стеновой панели. Уменьшение толщины слоя теплоизоляции – важный вопрос, поскольку производство трехслойных панелей затратно в энергетическом и материальном плане. Представлены особенности применения различного количества экранов для снижения размеров теплоизоляционного слоя. Приведен пример возможности максимального снижения размера теплоизоляционного слоя, когда толщина прослойки  $\delta_{пр}$  не может быть менее 3–5 мм. Показано, что общая толщина слоя теплоизоляции составит 0,057 м при наличии максимально возможного количества экранов – 12. Для данных условий рассчитаны температуры в плоскостях ограждения, по значениям которых определены величины максимальных парциальных давлений  $E$  и парциальных давлений водяного пара  $e$  (при вариантах перфорированных  $e'$  и неперфорированных  $e''$  экранов). По полученным значениям построены зависимости  $E$ ,  $e'$ ,  $e''$  от температуры в плоскостях ограждения. Проведенные расчеты и обобщающая оценка тепловлажностного режима в ограждающих конструкциях подтверждены с помощью составленной программы и расчета необходимых параметров  $e$  и  $t$  в слоях конструкции. Установлено, что для исключения зон конденсации при эксплуатации ограждающих конструкций можно использовать различные экранирующие материалы.

**Ключевые слова:** стеновая панель, толщина, ограждающая конструкция, теплоизоляционный слой, теплопередача, лучеиспускание, тепловая изоляция, экран

**Для цитирования:** Сизов, В. Д. Эффективная многослойная стеновая панель / В. Д. Сизов, А. В. Павловская // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 5. С. 410–418. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-410-418>

## Efficient Multi-Layer Wall Panel

V. D. Sizov<sup>1)</sup>, A. V. Pavlovskaya<sup>1)</sup>

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

**Abstract.** A comprehensive analysis of the multilayer wall panel has been performed. The heat-insulating layer, the thickness of which affects both the dimensions of the enclosing structure and the heat-shielding efficiency of the wall panel, has been studied. Reducing the thickness of the thermal insulation layer is an important issue, since the production of three-layer panels is expensive in energy and material terms. The features of using a different number of screens to reduce the size of the thermal insulation layer are presented. An example of the possibility of a maximum reduction in the size of the heat-insulating layer, when the thickness of the interlayer  $\delta_{in}$  cannot be less than 3–5 mm is given. It is shown that the total thickness of the thermal insulation layer will be 0.057 m in the presence of the maximum possible number of screens – 12. For these conditions, the temperatures in the enclosure planes are calculated, according to the values of which the values of the maximum partial pressures  $E$  and partial pressures of water vapor  $e$  are determined (for the variants of perforated  $e'$  and non-perforated  $e''$  screens). According to the obtained values the dependences  $E$ ,  $e'$ ,  $e''$  on the temperature in the planes of the fence are constructed. The calculations carried out and a general assessment of the heat and humidity regime in the enclosing structures were confirmed with the help of the compiled program and the calculation of the necessary parameters  $e$  and  $t$

### Адрес для переписки

Сизов Валерий Дмитриевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-93-52  
tg\_v\_fes@bntu.by

### Address for correspondence

Sizov Valeriy D.  
Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-93-52  
tg\_v\_fes@bntu.by

in the layers of the structure. It has been established that various shielding materials can be used to exclude condensation zones during the operation of enclosing structures.

**Keywords:** wall panel, thickness, enclosing structure, heat insulation layer, heat transfer, radiation emission, thermal insulation, screen

**For citation:** Sizov V. D., Pavlovskaya A. V. (2022) Efficient Multi-Layer Wall Panel. *Science and Technique*. 21 (5), 410–418. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-21-5-410-418> (in Russian)

## Введение

В настоящее время для производства наружных ограждающих конструкций в виде трехслойных панелей на заводах крупнопанельного домостроения и в монолитном строительстве тратится немало материальных и энергетических ресурсов. Трехслойные панели представляют собой сложную структуру, и чтобы изучить происходящие в них теплообменные процессы, следует проводить экспериментальные исследования. Но для этого нужно использовать большой парк массивных форм для тепловлажностной обработки (ТВО) панели, толщина которой 0,30 м и более. Кроме того, процесс самой ТВО достаточно длительный, что увеличивает как расход топливно-энергетические ресурсы, так и подъемно-транспортные расходы при перевозке и монтаже. Таким образом, максимальное уменьшение толщины панели в целом и толщины слоя теплоизоляции в частности (что существенно влияет на общую толщину изделия) является актуальной задачей.

Вместе с тем, даже используя любой эффективный теплоизоляционный материал (например, пенополистирол, коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,04$  Вт/(м·°C)), при нормативной величине термического сопротивления для оболочек жилых зданий  $R_{\text{норм}} = 3,2$  м<sup>2</sup>·°C/Вт [1] толщина слоя теплоизоляции составляет  $\delta_{\text{и}} = 0,12$  м, а общая толщина панели  $\delta_{\text{п}} \approx 0,30$  м (в СП 2.04.01–2020 с учетом повышающего коэффициента, равного 1,90,  $R_{\text{норм}} = 6,08$  м<sup>2</sup>·°C/Вт). Уменьшить толщину наружных ограждающих конструкций можно различными способами. Например, используя эффективные теплоизоляционные материалы и конструкции, а также вакуумированные прослойки, заполняя их газами с меньшей теплопроводностью [2].

## Применение экранов

### для уменьшения толщины многослойной стеновой панели

Поскольку в экранах в качестве тепловой изоляции используются воздушные прослойки, это позволяет значительно снизить теплоотдачу лучеиспусканием [2]. Наличие экранов [2] дает возможность уменьшить теплоперенос через прослойку в  $(n + 1)$  раз за счет снижения теплопередачи излучением при степенях черноты  $\varepsilon_i = \varepsilon_{\text{экв}} = \varepsilon_{\text{ч}}$ . В [3] показано, что такой способ уменьшает толщину воздушной прослойки и размер панели как наружной ограждающей конструкции, увеличивая ее термическое сопротивление, снижая энергозатраты на ТВО и сокращая время ее проведения.

При малой толщине воздушной газовой прослойки теплоперенос лучепрозрачным газом осуществляется в условиях, когда произведение критериев Грасгофа и Прандтля  $G_r \cdot P_r < 1000$ , влияние конвективных переносов теплоты не учитывается [4]. В широком интервале температур этому условию удовлетворяют газовые прослойки толщиной  $\delta_r < 10\text{--}20$  мм [5, 6], влияние температуры воздуха (от плюс 15 °C до минус 10 °C) в прослойке на ее теплопроводность незначительно.

Уменьшить толщину как теплоизоляционного слоя, так и всей конструкции панели без снижения величины нормативного термического сопротивления для жилых зданий ( $R_{\text{норм}} = 3,2$  м<sup>2</sup>·°C/Вт [1]) возможно в случае применения большого количества экранов из алюминиевой фольги без перфорации (или других аналогичных материалов) с минимально возможным расстоянием между ними. Перфорация экранов [7] нецелесообразна, так как увеличивает конвективные потоки, уменьшает площадь теплоотражающей поверхности и повышает степень черноты [4]. В случае алюминиевой фольги без перфорации герметичные воздушные прослойки защищены от попадания парообразной или капельной влаги, и даже при возникновении в слое температуры точки росы конденсация отсутствует. Такую конструкцию можно представить в виде фраг-

мента стеновой панели с экранированными воздушными прослойками (рис. 1).

При использовании пенополистирола ( $\lambda = 0,04 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ ) толщина теплоизоляционного слоя обычно принимается  $\delta = 0,12 \text{ м}$ , толщины наружного и внутреннего конструктивных слоев  $\delta_{\text{н}} = 0,06 \text{ м}$  и  $\delta_{\text{вн}} = 0,12 \text{ м}$  соответственно.

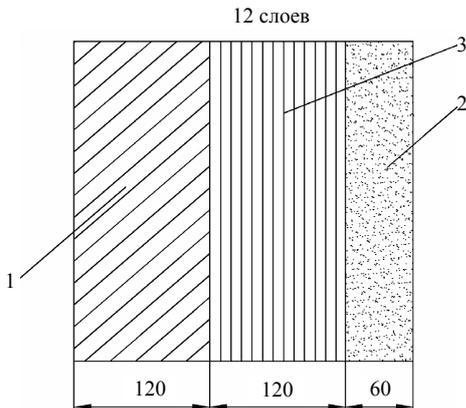


Рис. 1. Фрагмент стеновой панели (ед. измер. в мм):  
1 – внутренний слой; 2 – наружный слой бетона;  
3 – экранированная прослойка с лучепрозрачным газом в зазорах

Fig. 1. Fragment of wall panel (measuring units in mm):  
1 – inner layer; 2 – outer layer of concrete;  
3 – shielded layer with a ray-transparent gas in the gaps

### Максимальное уменьшение размеров теплоизоляционного слоя

Возможность максимального уменьшения толщины теплоизоляционного слоя, исходя из конструктивных особенностей панели, когда толщина  $\delta_{\text{пр}}$  каждой прослойки не может быть менее 3–5 мм, покажем на следующем примере. При условиях, соответствующих производству критериев  $G_{\text{r}} \cdot P_{\text{r}} < 1000$ , величина суммарной теплопередачи (за счет радиации и теплопроводности) определяется по формуле [4]

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

где  $q_{\text{л}}$  – радиационный тепловой поток,  $\text{Вт/м}^2$ ;  $q_{\text{к}}$  – тепловой поток теплопроводностью через газовую прослойку;  $T_1$ ,  $T_2$  – температура излучающей ( $T_1 = 290,04 \text{ К}$ ) и поглощаю-

щей ( $T_2 = 272,43 \text{ К}$ ) поверхностей [3];  $\lambda_{\text{г}}$  – коэффициент теплопроводности газовой прослойки,  $\lambda_{\text{г}} = 0,025 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $\delta_{\text{г}}$  – толщина газовой прослойки,  $\delta_{\text{г}} = 0,12 \text{ м}$ ;  $C_{\text{пр}}$  – приведенный коэффициент излучения,  $\text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ,

$$C_{\text{пр}} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, \quad (2)$$

$C_0$  – отражательная способность абсолютно черного тела,  $C_0 = 5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  – степени черноты поверхностей,  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,05$ .

Подставив в (1) численные значения, получим:

$$q_{\text{общ}} = q_{\text{л}} + q_{\text{к}} = \frac{5,67}{\frac{1}{0,05} + \frac{1}{0,05} - 1} \times \left[ \left( \frac{290,04}{100} \right)^4 - \left( \frac{272,43}{100} \right)^4 \right] + \frac{0,025}{0,12} (290,04 - 272,43) = 2,28 + 3,67 = 5,95 \text{ Вт/м}^2.$$

При использовании  $n$  экранов приведенный коэффициент излучения запишется в следующем виде:

$$C_{\text{пр}} = \frac{C_0}{(n+1) \cdot 2 \left( \frac{1}{\varepsilon_1} - \frac{1}{2} \right)}, \quad (3)$$

где  $n$  – число экранов;  $\varepsilon_1$  – степень черноты алюминиевой фольги.

Радиационный тепловой поток при наличии двух экранов и величина теплопередачи составят:

$$q_{\text{л}} = \frac{5,67}{(2+1) \cdot 2 \left( \frac{1}{0,05} - \frac{1}{2} \right)} \times \left[ \left( \frac{290,04}{100} \right)^4 - \left( \frac{272,43}{100} \right)^4 \right] = 0,76 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{\text{общ}} = 0,76 + 3,67 = 4,43 \text{ Вт/м}^2.$$

Эффективное термическое сопротивление

$$R_{\text{эф}} = \frac{t_1 - t_2}{q_{\text{общ}}} = \frac{17,04 - (-0,57)}{4,43} = 3,97 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}, \quad (4)$$

где  $t_1, t_2$  – температуры на внутренней и внешней границах теплоизоляционного слоя, принятые по [3].

Следовательно, толщину теплоизоляционного слоя  $\delta'$  можно уменьшить на величину

$$\Delta\delta = \lambda(R_{\text{эф}} - R_{\text{п.с}}) = 0,04 \cdot (3,97 - 3,0) = 0,04 \text{ м},$$

где  $R_{\text{п.с}}$  – термическое сопротивление слоя пенополистирола,  $R_{\text{п.с}} = 3,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ .

Тогда общая толщина слоя теплоизоляции при двух экранах

$$\delta' = \delta_{\text{н}} - \Delta\delta = 0,12 - 0,04 = 0,08 \text{ м}. \quad (5)$$

При наличии четырех экранов получим следующие значения вышеприведенных показателей:

$$q_{\text{л}} = \frac{5,67}{(4+1) \cdot 2 \cdot \left(\frac{1}{0,05} - \frac{1}{2}\right)} \times \left[ \left(\frac{290,04}{100}\right)^4 - \left(\frac{272,43}{100}\right)^4 \right] = 0,46 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{\text{общ}} = 0,46 + 3,67 = 4,13 \text{ Вт/м}^2;$$

$$R_{\text{эф}} = \frac{17,04 + 0,57}{4,13} = 4,26 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт};$$

$$\Delta\delta = 0,04 \cdot (4,26 - 3,0) = 0,05 \text{ м};$$

$$\delta' = 0,12 - 0,05 = 0,07 \text{ м}.$$

Для шести экранов получим следующие данные:

$$q_{\text{л}} = \frac{5,67}{(6+1) \cdot 2 \cdot \left(\frac{1}{0,05} - \frac{1}{2}\right)} \times \left[ \left(\frac{290,04}{100}\right)^4 - \left(\frac{272,43}{100}\right)^4 \right] = 0,33 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{\text{общ}} = 0,33 + 3,67 = 4,0 \text{ Вт/м}^2;$$

$$R_{\text{эф}} = \frac{17,04 + 0,57}{4,0} = 4,4 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт};$$

$$\Delta\delta = 0,04 \cdot (4,4 - 3,0) = 0,056 \text{ м};$$

$$\delta' = 0,12 - 0,056 = 0,064 \text{ м}.$$

При наличии десяти экранов:

$$q_{\text{л}} = \frac{5,67}{(10+1) \cdot 2 \cdot \left(\frac{1}{0,05} - \frac{1}{2}\right)} \times \left[ \left(\frac{290,04}{100}\right)^4 - \left(\frac{272,43}{100}\right)^4 \right] = 0,21 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{\text{общ}} = 0,21 + 3,67 = 3,88 \text{ Вт/м}^2;$$

$$R_{\text{эф}} = \frac{17,04 + 0,57}{3,88} = 4,53 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт};$$

$$\Delta\delta = 0,04 \cdot (4,53 - 3,0) = 0,061 \text{ м};$$

$$\delta' = 0,12 - 0,061 = 0,059 \text{ м}.$$

Для двенадцати экранов значения показателей будут следующими:

$$q_{\text{л}} = \frac{5,67}{(12+1) \cdot 2 \cdot \left(\frac{1}{0,05} - \frac{1}{2}\right)} \times \left[ \left(\frac{290,04}{100}\right)^4 - \left(\frac{272,43}{100}\right)^4 \right] = 0,18 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{\text{общ}} = 0,18 + 3,67 = 3,85 \text{ Вт/м}^2;$$

$$R_{\text{эф}} = \frac{17,04 + 0,57}{3,85} = 4,57 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт};$$

$$\Delta\delta = 0,04 \cdot (4,57 - 3,0) = 0,063 \text{ м};$$

$$\delta' = 0,12 - 0,063 = 0,057 \text{ м}.$$

Толщина газовой прослойки при наличии 12 экранов

$$\delta_{\text{г}} = \frac{\delta'}{n} = \frac{0,057}{12} = 4,8 \text{ мм}.$$

Приведенные расчеты показывают, что при максимальном количестве экранов – 12 (рис. 2) – общая величина слоя теплоизоляции составит 0,057 м, а толщина газовой прослойки  $\delta_{\text{г}} = 4,8$  мм. В данном случае  $G_{\text{г}} \cdot P_{\text{г}} < 1000$ , и теплоперенос будет осуществляться только за счет теплопроводности лучепрозрачных газов [4].

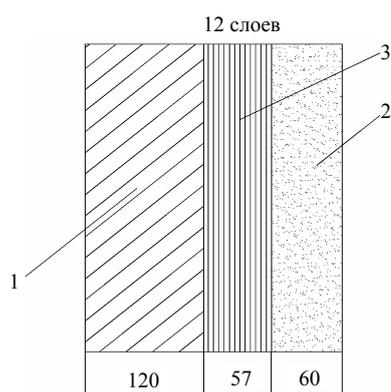


Рис. 2. Фрагмент стеновой панели с рассчитанной толщиной слоя теплоизоляции (ед. измер. в мм): 1–3 – то же, что на рис. 1

Fig. 2. Fragment of wall panel with calculated thermal insulation layer thickness (measuring units in mm): 1–3 – the same as in Fig. 1

Дальнейшее увеличение количества экранов нерационально из-за сложности их изготовления и установки с зазором до 5 мм. Целесообразность использования перфорированных или неперфорированных экранов для исключе-

ния перетока газов между прослойками подтверждается расчетом тепловлажностного режима ограждающей конструкции для этих двух случаев при наиболее неблагоприятных условиях – средней месячной температуре воздуха самого холодного месяца  $t_n = -6,9$  °С для г. Минска. Следует отметить, что применение неперфорированных экранов предотвращает появление зон конденсации в конструкции в любом случае [7].

При наличии 12 экранов и общей толщине теплоизоляционного слоя 0,057 м были рассчитаны температуры в плоскостях ограждения. По этим значениям определяли величины максимальных парциальных давлений  $E$  [1, 8, 9], а по известным соотношениям [8] – значения парциальных давлений водяного пара  $e$  при вариантах перфорированных  $e'$  или неперфорированных  $e''$  экранов. В случае перфорированных экранов сопротивление паропроницанию  $R_n = 11$  м<sup>2</sup>·ч·Па/мг, а для неперфорированных  $R_n = 100$  м<sup>2</sup>·ч·Па/мг [8–11]. Полученные в процессе исследований величины приведены в табл. 1.

Таблица 1

Максимальные и действительные парциальные давления в плоскостях ограждения  
Maximum and actual partial pressures in the fencing planes

Средняя месячная температура воздуха наиболее холодного месяца	Определяемый параметр	Номер плоскости							
		1	2	3	4	5	6	7	8
$t_n = -6,9$ °С	Температура в плоскостях ограждения $t$ , °С	17,3	16,6	14,8	13,1	11,3	9,6	7,8	6,04
	Максимальное парциальное давление $E$ , Па	1975	1889	1684	1498	1330	1190	1058	935
	Действительное парциальное давление $e'$ , Па, $R_n = 11$ м <sup>2</sup> ·ч·Па/мг	1135	1117	1048	980	912	844	775	707
	Действительное парциальное давление $e''$ , Па, $R_n = 100$ м <sup>2</sup> ·ч·Па/мг	1135	1133	1062	992	922	851	780	710
Средняя месячная температура воздуха наиболее холодного месяца	Определяемый параметр	Номер плоскости							
		9	10	11	12	13	14	15	16
$t_n = -6,9$ °С	Температура в плоскостях ограждения $t$ , °С	4,3	2,5	0,73	-1,03	-2,78	-4,57	-6,28	-6,79
	Максимальное парциальное давление $E$ , Па	831	732	643	563	484	416	359	344
	Действительное парциальное давление $e'$ , Па, $R_n = 11$ м <sup>2</sup> ·ч·Па/мг	639	571	503	434	366	298	298	279
	Действительное парциальное давление $e''$ , Па, $R_n = 100$ м <sup>2</sup> ·ч·Па/мг	639	569	498	428	357	287	287	285

По значениям из табл. 1 построены зависимости  $E$ ,  $e'$  и  $e''$  от температуры в плоскостях ограждения (рис. 3). По данным табл. 1 и графикам на рис. 3 видно, что в обоих случаях (для экранов с перфорацией и без нее) отсутствуют зоны конденсации ( $e'' > e'$ ). Но при использовании экранов без перфорации этот фактор в большинстве слоев более существен.

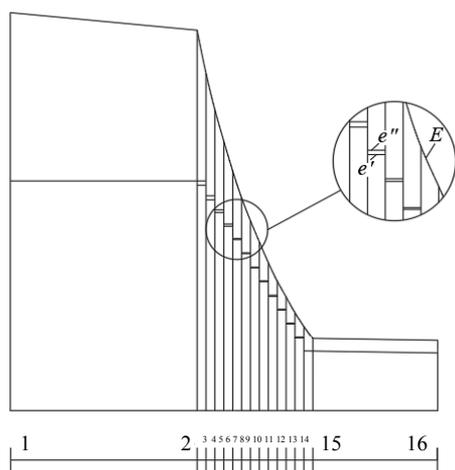


Рис. 3. Зависимости  $E$ ,  $e'$ ,  $e''$  от температуры в плоскостях ограждения 1–16

Fig. 3. Dependence  $E$ ,  $e'$ ,  $e''$  from temperature in the fence planes 1–16

### Оценка тепловлажностного режима стеновой панели

Для подтверждения проведенных расчетов и обобщающей оценки тепловлажностного режима в стеновой панели составили программу и произвели расчет необходимых параметров  $e$ ,  $t$  при различных значениях температур наружного и внутреннего воздуха. Конструкцию рассчитывали при наличии 10 экранов

и толщине прослойки 10 мм (рис. 4). Экраны были изготовлены из стекловолокна.

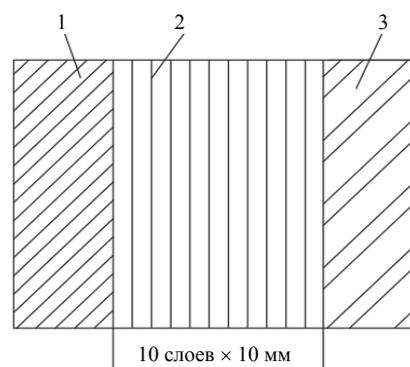


Рис. 4. Фрагмент стеновой панели при наличии 10 экранов из стекловолокна: 1, 3 – внутренний и наружный слои; 2 – экранированная прослойка

Fig. 4. Fragment of wall panel in the presence of 10 fiberglass screens: 1, 3 – inner and outer layers; 2 – shielded interlayer

В табл. 2 приведены показатели, рассчитанные при следующих вариантах начальных условий для плоскостей стеновой панели:

- степень черноты стекловолокна  $\varepsilon = 0,924 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;
- $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;
- количество экранов  $n = 10$  шт.;
- приведенный коэффициент излучения  $C_{пр} = 0,442639$ ;
- коэффициент теплопроводности газовой прослойки  $\lambda_r = 0,025 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;
- толщина газовой прослойки  $\delta_r = 0,01 \text{ м}$ .

По значениям, приведенным в табл. 2, находили максимальные парциальные давления  $E$ , а по известным соотношениям – величины парциальных давлений водяного пара  $e$ . Полученные показатели сведены в табл. 3.

Таблица 2

Данные для расчета  
Data for calculation

Показатель	Вариант расчета			
	1	2	3	4
Температура внутреннего воздуха $t_{вн}$ , °С	18	14	12	10
Температура излучающей поверхности $T_1$ при $t_{вн}$ , К	291	287	285	283
Температура наружного воздуха $t_{н}$ , °С	–25	–15	–10	0
Температура поглощающей поверхности $T_2$ при $t_{н}$ , К	248	258	263	273
$q_{общ}$ , Вт/м <sup>2</sup>	122,5	82,92	63,03	28,81
$q_{общ}$ без учета толщины прослойки, Вт/м <sup>2</sup>	15	10,42	8,03	3,81
Эффективное термическое сопротивление $R$ , м <sup>2</sup> ·°С/Вт	0,35	0,35	0,35	0,35

Максимальные парциальные давления  $E$  и парциальные давления водяного пара  $e$  в плоскостях ограждения  
Maximum partial pressures  $E$  and partial pressures of water vapor  $e$  in the fencing planes

Показатель	Номер плоскости										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Вариант 1											
$t, ^\circ\text{C}$	18,00	13,71	9,42	5,13	0,84	-3,45	-7,74	-12,03	-16,32	-20,61	-24,9
$E, \text{Па}$	2064	1500	1175	892	642	452	321	217	141	98	63
$e, \text{Па}$	1238,4	900,0	705,0	535,2	385,2	271,2	192,6	130,2	84,6	58,8	37,8
Вариант 2											
$t, ^\circ\text{C}$	14,0	11,1	8,2	5,3	2,4	-0,5	-3,4	-6,3	-9,2	-12,1	-15,0
$E, \text{Па}$	1599	1321	1091	884	731	576	452	341	274	215	165
$e, \text{Па}$	959,4	792,6	654,6	530,4	438,6	345,6	271,2	204,6	164,4	129,0	99,0
Вариант 3											
$t, ^\circ\text{C}$	12,00	9,79	7,58	5,37	3,16	0,95	-1,26	-3,47	-5,68	-7,89	-10,10
$E, \text{Па}$	1403	1210	1050	901	770	650	540	453	380	315	254
$e, \text{Па}$	841,8	726,0	630,0	540,6	462	390,0	324,0	271,8	228,0	189,0	152,4
Вариант 4											
$t, ^\circ\text{C}$	10,00	8,99	7,98	6,97	5,96	4,95	3,94	2,93	1,92	0,91	-0,10
$E, \text{Па}$	1228	1148	1072	1001	935	872	813	760	705	657	614
$e, \text{Па}$	736,8	688,8	643,2	600,6	561,0	523,2	487,8	456,0	423,0	394,2	368,4

С учетом данных табл. 3 построены зависимости  $E$  и  $e$  от температуры в плоскостях ограждения для четырех вариантов начальных условий (рис. 5–12).

Проведенные расчеты и графики показывают, что, с точки зрения возможности появле-

ния конденсации, можно использовать любые экранирующие материалы, в том числе стекловолокно с отражающим эффектом. При этом величина теплового потока уменьшается в 4,25 раза при снижении разности температур в 4,3 раза, а  $E \geq e$  постоянно.

Вариант 1

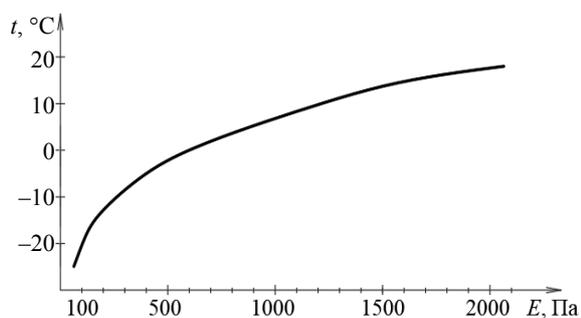


Рис. 5  
Fig. 5

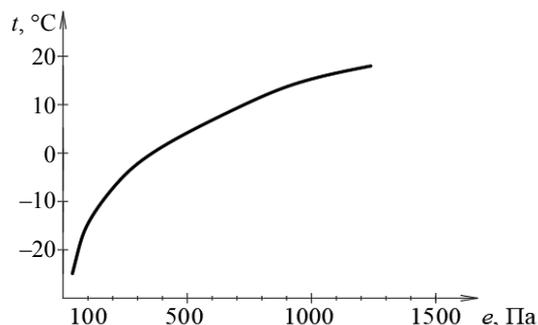
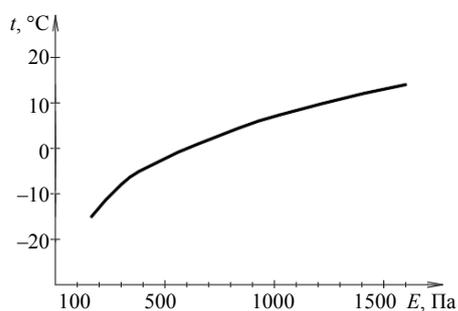
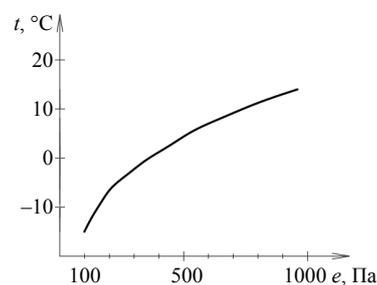
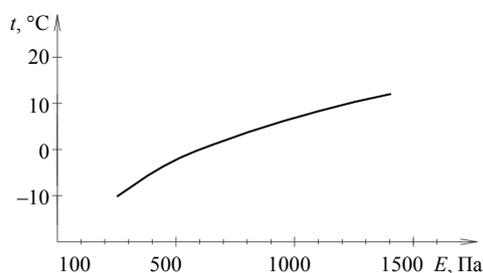
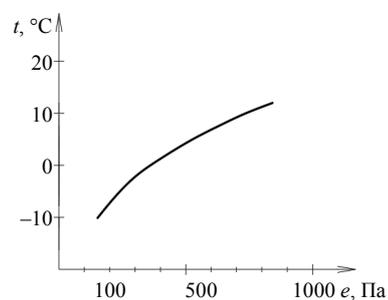


Рис. 6  
Fig. 6

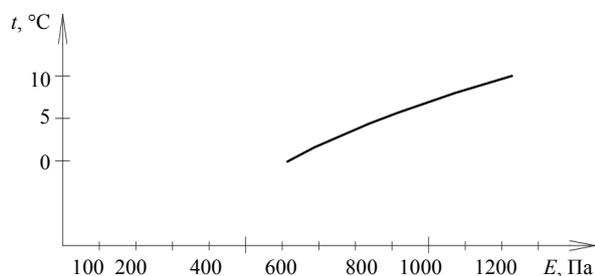
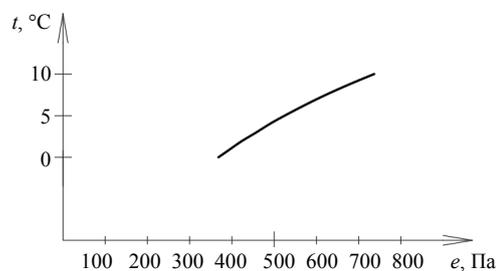
## Вариант 2

Рис. 7  
Fig. 7Рис. 8  
Fig. 8

## Вариант 3

Рис. 9  
Fig. 9Рис. 10  
Fig. 10

## Вариант 4

Рис. 11  
Fig. 11Рис. 12  
Fig. 12

## ВЫВОДЫ

1. Для максимального уменьшения толщины ограждающих конструкций целесообразно между воздушными прослойками устраивать экраны из алюминиевой фольги (или другого материала) с минимальными размерами прослоек между ними, что исключает применение полиуретана, сохраняя значение нормативного термического сопротивления  $R_{\text{норм}} = 3,2 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ .

2. Использование экранной теплоизоляции с экранами из любых материалов исключает

появление зон конденсации при эксплуатации ограждающих конструкций в неблагоприятном температурном режиме.

3. Разработанный метод позволяет уменьшить толщину ограждающей конструкции и размеры форм, применять старый парк форм, повысить эффективность использования тепловых ресурсов при тепловлажностной обработке на 15–20 %.

4. В качестве экранов можно применять любые экранирующие материалы, например сетку из полиэтилена, алюминиевую фольгу с эле-

ментами рифления, деформированную стеклоткань с отражающим эффектом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Здания и сооружения. Энергетическая эффективность: СН 2.04.02–2020. Введ. 30.03.2021. Минск: Минстрой-архитектуры, 2021. 24 с.
2. Тепло- и массообмен: в 2 ч. / Б. М. Хрусталева [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука. Минск: БНТУ, 2007. Ч. 1. 606 с.
3. 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. учебн. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. № 1. С. 46–55.
4. Иванцов, Г. П. Теплопередача излучением в огнетехнических установках (инженерные решения задач) / Г. П. Иванцов. М.: Энергия, 1970. 400 с.
5. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К. Ф. Фокин. 5-е изд. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.
6. Многослойная стеновая панель: пат. Респ. Беларусь № 18473 / Б. М. Хрусталева, В. Д. Сизов, В. Д. Акельев, Л. В. Нестеров. Опубл. 30.08.2014.
7. Сизов, В. Д. Влияние местоположения неперфорированного экрана на процесс теплопередачи в наружных ограждающих конструкциях зданий / В. Д. Сизов, Л. В. Нестеров, В. М. Копко // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 2. С. 119–124. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-119-124>.
8. Протасевич, А. М. Строительная теплофизика ограждающих конструкций и микроклимат помещений / А. М. Протасевич. Минск: БНТУ, 2016. 452 с.
9. Кудинов, А. А. Строительная теплофизика / А. А. Кудинов. М.: ИНФРА-М, 2016. 262 с.
10. Multi-Layer Building Insulation and Wallboard Sheet with Multi-Layer Insulation: Pat. US8011151B2 / R. W. Pollack. Publ. date 06.09.2011.
11. Многослойная стеновая панель: пат. Респ. Беларусь № 20723 / Б. М. Хрусталева, В. Д. Сизов, Л. В. Нестеров. Опубл. 28.02.2017.

Поступила 20.05.2022  
Подписана в печать 21.07.2022  
Опубликована онлайн 30.09.2022

REFERENCES

1. SN [Building Regulation] 2.04.02–2020. Buildings and Structures. Energy Efficiency. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2021. 24 (in Russian).
2. Khrustalev B. M., Nesenchuk A. P., Timoshpol'skii V. I., Akel'ev V. D., Sednin V. A., Kopko V. M., Nerez'ko A. V. (2007) *Heat and Mass Transfer. Part 1*. Minsk, Belarusian National Technical University. 606 (in Russian).
3. 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. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 46–55 (in Russian).
4. Ivantsov G. P. (1970) *Heat Transfer by Radiation in Fire Engineering Installations (Engineering Problem Solving)*. Moscow, Energiya Publ. 400 (in Russian).
5. Fokin K. F. (2006) Construction Heat Engineering of Enclosing Parts of Buildings. 5<sup>th</sup> ed. Moscow, AVOK-PRESS Publ. 256 (in Russian).
6. Khrustalev B. M., Sizov V. D., Akeliev V. D., Nesterov L. V. (2014) *Multilayer wall Panel*. Patent of the Republic of Belarus No 18473 (in Russian).
7. Sizov V. D., Nesterov L. V., Kopko V. M. (2017) Influence of Non-Perforated Screen Location on Heat Transfer Process in Building Enclosing Parts. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (2), 119–124. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-119-124> (in Russian).
8. Protasevich A. M. (2016) *Building Thermal Physics of Enclo-Sing Structures and Indoor Microclimate*. Minsk, Belarusian National Technical University. 452 (in Russian).
9. Kudinov A. A. (2016) *Building Thermal Physics*. Moscow, INFRA-M Publ. 262 (in Russian).
10. Pollack R. W. (2011) *Multi-Layer Building Insulation and Wallboard Sheet with Multi-Layer Insulation*. Patent US8011151B2.
11. Khrustalev B. M., Sizov V. D., Nesterov L. V. (2017) *Multilayer Wall Panel*. Patent of the Republic of Belarus No 20723 (in Russian).

Received: 20.05.2022  
Accepted: 21.07.2022  
Published online: 30.09.2022