

DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-157-164

УДК 666.157.6

## Некоторые способы экономии тепловой энергии при производстве вертикальных стеклопакетов

Инж. А. С. Шибeko<sup>1)</sup><sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2018  
Belarusian National Technical University, 2018

**Реферат.** Предложены и рассмотрены два конструктивных способа экономии тепловой энергии при производстве вертикальных стеклопакетов с различным газовым заполнением межстекольного пространства. Первый заключается в изготовлении их определенной толщины, которая находится исходя из особенностей конвективного теплообмена в замкнутом контуре. Величина коэффициента теплообмена зависит от свойств заполняющего объем камеры газа (коэффициентов теплопроводности, объемного расширения, кинематической вязкости и температуропроводности), разности температур на границах прослойки и ее толщины. Показано, что при увеличении толщины газового слоя коэффициент конвективного теплообмена сначала уменьшается до определенного значения, а затем, незначительно увеличившись, практически остается постоянным. В связи с этим были определены оптимальные толщины заполняемых прослоек для наиболее распространенных в производстве газов (осушенный воздух, аргон, криптон, ксенон), а также для углекислого газа. Производство стеклопакетов с большей толщиной газовой камеры практически не приведет к увеличению сопротивления теплопередаче, однако повысит расход газа. Второй способ экономии при производстве связан с использованием в качестве заполнителя межстекольного пространства диоксида углерода CO<sub>2</sub>, который имеет некоторые преимущества по сравнению с другими газами (малая стоимость из-за распространенности, нетоксичность, прозрачность для видимого света и поглощение тепловых лучей). Расчеты показали, что применение углекислого газа позволит увеличить сопротивление теплопередаче однокамерного стеклопакета на 0,05 м<sup>2</sup>·К/Вт (при степени черноты внутреннего стекла 0,837) или на 0,16 м<sup>2</sup>·К/Вт (при коэффициенте эмиссии 0,1) по сравнению со стеклопакетом, камера которого заполнена осушенным воздухом.

**Ключевые слова:** стеклопакет, сопротивление теплопередаче, газовая прослойка, конвективный теплообмен, теплообмен излучением

**Для цитирования:** Шибeko, А. С. Некоторые способы экономии тепловой энергии при производстве вертикальных стеклопакетов / А. С. Шибeko // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 2. С. 157–164. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-157-164

## Some Methods for Saving Heat Energy while Manufacturing Vertical Insulating Glass Units

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

**Abstract.** The paper proposes and considers two constructive methods for saving heat energy while manufacturing vertical insulating glass units with various gas filling of inter-glass space. The first method presupposes manufacturing of insulating glass units having specific thickness which is calculated in accordance with specific features of convective heat exchange in the closed loop circuit. Value of the heat-exchange coefficient depends on gas properties which is filling a chamber capacity (coefficients of thermal conductivity, volumetric expansion, kinematic viscosity, thermometric conductivity), temperature difference on the boundary of interlayer and its thickness. It has been shown that while increasing thickness of gas layer

### Адрес для переписки

Шибeko Александр Сергеевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 150,  
220114, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 265-97-29  
tg\_v\_fes@bntu.by

### Address for correspondence

Shybeka Alexander S.  
Belarusian National Technical University  
150 Nezavisimosty Ave.,  
220114, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 265-97-29  
tg\_v\_fes@bntu.by

convective heat exchange coefficient is initially decreasing up to specific value and then after insignificant increase it practically remains constant. In this connection optimum thicknesses of filled inter-layers for widely-spread gas in production (dry air, argon, krypton, xenon) and for carbon dioxide have determined in the paper. Manufacturing of insulating glass units with large thickness of gas chamber practically does not lead to an increase in resistance to heat transfer but it will increase gas consumption rate. The second industrial economic method is interrelated with application of carbon dioxide CO<sub>2</sub> as a filler of inter-glass space which has some advantages in comparison with other gases (small cost due to abundance, non-toxicity, transparency for visual light and absorption of heat rays). Calculations have shown that application of carbon dioxide will make it possible to increase resistance to heat transfer of one-chamber glass unit by 0.05 m<sup>2</sup>·K/W (with emissivity factor of internal glass – 0.837) or by 0.16 m<sup>2</sup>·K/W (with emission factor – 0.1) in comparison with the glass unit where a chamber is filled with dry air.

**Keywords:** insulating glass unit, resistance to heat transfer, gas interlayer, convective heat exchange, radiant heat transfer

**For citation:** Shybeka A. S. (2018) Some Methods for Saving Heat Energy while Manufacturing Vertical Insulating Glass Units. *Science and Technique*. 17 (2), 157–164. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-157-164 (in Russian)

В настоящее время на мировом строительном рынке, и в частности на белорусском, среди светопрозрачных заполнений световых проемов (окон, балконных, наружных дверей, светопрозрачных фасадов) доминируют стеклопакеты. Стеклопакетом (рис. 1) называются соединенные между собой с помощью рамки листы стекла, образующие герметичные камеры, заполненные осушенным воздухом или инертными газами (аргон, криптон и др.). Для изготовления стеклопакетов применяются разнообразные виды стекла: листовое, многослойное, солнцезащитное, энергосберегающее с твердым и мягким покрытиями и др.

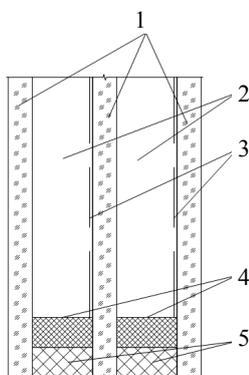


Рис. 1. Конструкция двухкамерного энергосберегающего стеклопакета: 1 – стекло; 2 – газовая прослойка; 3 – рекомендуемое расположение низкоэмиссионного покрытия; 4 – дистанционная рамка; 5 – герметик

Fig. 1. Design of double-chamber energy-saving insulating glass unit: 1 – glass; 2 – gas interlayer; 3 – recommended location of low emission coating; 4 – distance frame; 5 – sealing agent

Политика энергосбережения, проводимая во всем мире, диктует жесткие требования к теплозащитным свойствам наружных ограждающих конструкций. Для заполнений световых

проемов жилых, общественных и административных зданий сопротивление теплопередаче в Республике Беларусь должно составлять не менее 1,0 м<sup>2</sup>·K/Вт [1], в Российской Федерации – от 0,3 до 0,8 м<sup>2</sup>·K/Вт (в зависимости от градусо-суток отопительного периода) [2]. Для получения данного значения, наряду с применением новых профильных систем и материалов для непрозрачных частей окна, необходимо использование стеклопакетов, в которых имеются энергосберегающие стекла с низкоэмиссионным «мягким» селективным покрытием (И-стекла), а межстекольные пространства заполняются инертными газами. В настоящее время выпускаются стеклопакеты с толщиной газовой прослойки от 6 до 20 мм.

Сопротивление теплопередаче стеклопакета  $R_T^{ст}$ , м<sup>2</sup>·K/Вт, рассчитывается по выражению [3]

$$R_T^{ст} = \frac{1}{\alpha_B} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \sum_{k=1}^m R_k + \frac{1}{\alpha_H}, \quad (1)$$

где  $\alpha_B$ ,  $\alpha_H$  – коэффициент теплообмена у внутренней и наружной поверхностей стеклопакета, Вт/(м<sup>2</sup>·K);  $\delta_i$  – толщина каждого из слоев остекления, м;  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности слоя остекления, Вт/(м·K) (для обычного натрий-кальциевого стекла  $\lambda_i = 1,0$  Вт/(м·K));  $n$  – количество стекол;  $R_k$  – термическое сопротивление газовых прослоек, м<sup>2</sup>·K/Вт;  $m$  – количество межстекольных пространств.

Так как термическое сопротивление стекол  $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$  весьма мало, а величины  $\alpha_B$  и  $\alpha_H$  постоянны, сопротивление теплопередаче стеклопакета в основном определяется термическим сопротивлением газовых прослоек, для каждой из которых  $R_k$  находится как

$$R_k = \frac{1}{\alpha_{k,к} + \alpha_{k,л}}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{k,к}$  – коэффициент конвективной теплоотдачи газовой прослойки, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_{k,л}$  – коэффициент лучистой теплоотдачи межстекольного пространства, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Поскольку большинство газов, используемых при заполнении прослоек, является одно- и двухатомными, т. е. диатермическими для тепловых лучей, то лучистая составляющая теплообмена определяется оптическими свойствами стекол (коэффициентами эмиссии) и не зависит от толщины газовой прослойки.

Таким образом, величина межстекольного пространства влияет только на конвективную составляющую. Значение коэффициента конвективного теплообмена определяется исходя из критерия Нуссельта  $Nu$  по выражению [4, 5]

$$\alpha_k = \frac{Nu\lambda}{l}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К);  $l$  – характерный размер, м.

Для вертикальных стеклопакетов характерным размером будет служить толщина газовой прослойки  $\delta$ , м. Число Нуссельта  $Nu_\delta$  будет зависеть от физических свойств среды и режима течения в прослойке, который определяется значением критерия Рэлея  $Ra_\delta$

$$Ra_\delta = \frac{g\beta_r \Delta t \delta^3}{\nu_r a_r}, \quad (4)$$

где  $\beta_r$  – температурный коэффициент объемного расширения, 1/К, при рассмотрении газа прослойки как идеального можно рассчитать как

$$\beta_r = \frac{1}{T_{cp}}, \quad (5)$$

$T_{cp}$  – средняя температура газа в межстекольном пространстве, К;  $\Delta t$  – разность температур на границах прослойки, °С;  $\nu_r$ ,  $a_r$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с, и температуропроводности, м<sup>2</sup>/с, газа прослойки при средней температуре газа в прослойке  $T_{cp}$ .

Для определения  $Nu_\delta$ , согласно [3, 6], используется следующее выражение:

$$Nu_\delta = ARa_\delta^n, \quad (6)$$

где  $A$ ,  $n$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от ориентации в пространстве стеклопакета:

– для вертикального остекления  $A = 0,035$  и  $n = 0,380$ ;

– для горизонтального остекления при направлении теплового потока снизу вверх  $A = 0,16$  и  $n = 0,28$ ;

– для наклонного остекления при направлении теплового потока вверх и угле наклона 45°  $A = 0,10$  и  $n = 0,31$ .

Если значение числа Нуссельта получилось меньше единицы, а также для горизонтального остекления при потоке теплоты сверху вниз принимается  $Nu_\delta = 1$ .

Таким образом, максимальное значение критерия Рэлея, при котором число Нуссельта будет равно единице, составляет

$$Ra_\delta = A^{-1/n}. \quad (7)$$

Подставив указанные выше данные для вертикального стеклопакета, получим  $Ra_\delta^{opt} = 0,035^{-1/0,38} = 6782,7$ .

Член ASHRAE (American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers – Американское общество инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха) Джон Райт предложил иные аппроксимирующие зависимости для определения  $Nu_\delta$  при различных значениях  $Ra_\delta$  для вертикальных остеклений [7]:

– для  $Ra_\delta \leq 10000$

$$Nu_\delta = 1 + 1,75967 \cdot 10^{-10} Ra_\delta^{2,2984755}; \quad (8)$$

– для  $10000 < Ra_\delta \leq 50000$

$$Nu_\delta = 0,028154 Ra_\delta^{0,41399}; \quad (9)$$

– для  $Ra_\delta > 50000$

$$Nu_\delta = 0,0673838 Ra_\delta^{1/3}. \quad (10)$$

Согласно данным исследованиям, минимальное значение коэффициента конвективного теплообмена для вертикального стеклопакета достигается при числе Рэлея  $Ra_\delta^{opt} = 10000$ .

Значения коэффициента конвективного теплообмена  $\alpha_k$ , рассчитанные для вертикальной воздушной прослойки при разности температур на границах 25 °С и средней температуре в прослойке 0 °С, представлены на рис. 2. Ли-

ния 1 соответствует методике СТБ EN 673 [3], линия 2 – согласно аппроксимационным зависимостям Дж. Райта.

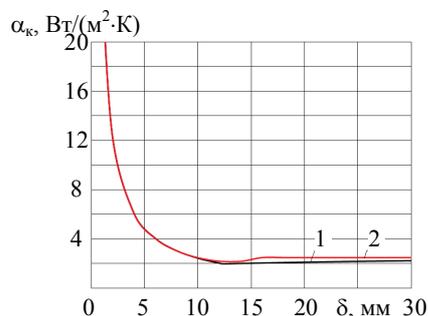


Рис. 2. Расчетные значения коэффициента  $\alpha_k$  для вертикального стеклопакета

Fig. 2. Calculated values of coefficient  $\alpha_k$  for vertical insulating glass unit

Как видно из графиков рис. 2, до определенного значения толщины они совпадают, а далее возникает локальный минимум, после которого значение коэффициента немного возрастает и становится практически постоянным при увеличении толщины воздушной прослойки. Тол-

щина, при которой наблюдается минимум коэффициента конвективного теплообмена, в дальнейшем будет называться оптимальной  $\delta_{\text{опт}}$ , м. Ее величину можно найти исходя из (4)

$$\delta_{\text{опт}} = \sqrt[3]{\frac{Ra_{\delta}^{\text{опт}} \nu_r a_r}{g \beta_r \Delta t}} \quad (11)$$

Для определения оптимальной толщины примем, что в однокамерном стеклопакете средняя температура в прослойке составляет  $0^{\circ}\text{C}$  ( $273\text{ K}$ ), а разность температур  $\Delta t = 25^{\circ}\text{C}$ . Для двухкамерного стеклопакета примем, что средняя температура в первой (внутренней) камере  $10^{\circ}\text{C}$ , во второй (наружной) – минус  $10^{\circ}\text{C}$ , а разность температур в каждой из камер  $\Delta t = 15^{\circ}\text{C}$ . Значения оптимальных толщин прослоек, определенные при оптимальных числах Рэлея  $Ra_{\delta}^{\text{опт}} = 6782,7$  (согласно СТБ EN 673 [3]) и  $Ra_{\delta}^{\text{опт}} = 10000$  (из статьи Дж. Райта), заполненных различными газами, а также соответствующие данным толщинам коэффициенты конвективного теплообмена приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Оптимальная толщина газовой прослойки стеклопакетов и соответствующий ей минимальный коэффициент конвективного теплообмена**

**Optimum thickness of gas interlayer in insulating glass units and corresponding minimum coefficient of convective heat transfer**

Газ	$T_{\text{ср}}, \text{K}$	$\lambda_r \cdot 10^3, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$c, \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu_r \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$a_r \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\Delta t, ^{\circ}\text{C}$	$\delta_{\text{опт}}, \text{мм}$	$\alpha_k^{\text{min}}, \text{Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$	$\delta_{\text{опт}}, \text{мм}$	$\alpha_k^{\text{min}}, \text{Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$
							СТБ EN 673		Дж. Райт	
<b>Однокамерный стеклопакет</b>										
Воздух	273	24,16	1008	13,40	18,77	25	12	2,01	14	2,18
Аргон	273	16,34	519	11,92	17,87	25	12	1,40	13	1,55
Криптон	273	8,70	245	6,31	9,62	25	8	1,13	9	1,44
Ксенон	273	5,12	161	3,65	5,39	25	5	1,02	6	1,08
Углекислый газ	273	14,68	822	6,95	9,09	25	8	1,89	9	2,40
<b>Двухкамерный стеклопакет</b>										
Воздух	283	24,96	1008	14,29	20,10	15	16	1,61	18	2,05
	263	23,36	1008	12,53	17,48	15	14	1,69	16	2,15
Аргон	283	16,84	519	12,74	19,10	15	15	1,15	17	1,46
	263	15,84	519	11,14	16,69	15	13	1,22	15	1,54
Криптон	283	9,00	245	6,74	10,32	15	10	0,93	11	1,04
	263	8,42	245	5,90	8,97	15	9	0,98	10	1,25
Ксенон	283	5,29	161	3,91	5,78	15	7	0,80	8	1,01
	263	4,94	161	3,39	5,01	15	6	0,84	7	1,07
Углекислый газ	283	15,43	833	7,46	9,77	15	10	1,57	11	1,74
	263	13,89	811	6,45	8,40	15	9	1,61	10	2,04

**Примечание.** Значения теплофизических свойств воздуха, аргона, криптона и ксенона приняты по [3], а углекислого газа определены по [8].

Как видно из табл. 1, толщины практически совпадают (отличие составляет 1–2 мм). Сравненная с аналогичными данными из [9], ближе получаются значения, определенные исходя из аппроксимаций Дж. Райта. Кроме того, толщина внутренней камеры в двухкамерном стеклопакете должна быть немного больше наружной. Помимо теплотехнических задач, большая ширина внутренней камеры увеличивает звукоизоляцию стеклопакета (до 3 дБ).

Стоит отметить, что в настоящее время стеклопакеты с углекислым газом на строительном рынке отсутствуют. Однако диоксид углерода имеет такие преимущества по сравнению с другими вариантами наполнителей, как:

– малая стоимость вследствие распространенности (стоимость баллона объемом 40 л с  $\text{CO}_2$  составляет 10,0 бел. руб., а аргона – 17,3 бел. руб.);

– то, что он практически безвреден: при концентрации до 0,1 % (или 1,83 г/м<sup>3</sup>) не вызывает никакого побочного воздействия (в воздухе больших городов концентрация составляет около 0,055 %, или 1,0 г/м<sup>3</sup> [10]);

– прозрачность для лучей в видимом диапазоне, но так как двуокись углерода является трехатомным газом, то она способна поглощать тепловое излучение (относится к парниковым газам).

На последнем пункте стоит остановиться подробнее. Коэффициент лучистого теплообмена  $\alpha_{\text{л}}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), для однокамерного стеклопакета, заполненного лучепоглощающей средой, будет определяться по выражению [11]

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{\sum q}{T_1 - T_2}, \quad (12)$$

где  $\sum q$  – поверхностная плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>, передаваемая от внутреннего стекла 1 с температурой  $T_1$  к наружному стеклу 2, имеющего температуру  $T_2$ , рассчитываемая как сумма непосредственно передаваемого удельного теплового потока  $q_{1 \rightarrow 2}$  и мощности теплового потока от газа к стеклу  $q_{\text{г} \rightarrow 2}$

$$\sum q = q_{1 \rightarrow 2} + q_{\text{г} \rightarrow 2}. \quad (13)$$

Слагаемые в (13) определяются по следующим выражениям:

$$q_{1 \rightarrow 2} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 (1 - \varepsilon_{\text{г}})}{1 - (1 - \varepsilon_{\text{г}})^2 (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)} \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4); \quad (14)$$

$$q_{\text{г} \rightarrow 2} = \frac{\varepsilon_{\text{г}} \varepsilon_2 [1 + (1 - \varepsilon_{\text{г}})(1 - \varepsilon_1)]}{1 - (1 - \varepsilon_{\text{г}})^2 (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)} \sigma_0 (T_{\text{г}}^4 - T_2^4), \quad (15)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – степень черноты (коэффициент эмиссии) стеклов 1 и 2 соответственно (для обычного натрий-кальциевого стекла без покрытия  $\varepsilon = 0,837$  [3]);  $\varepsilon_{\text{г}}$  – степень черноты газа, заполняющего прослойку;  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная излучения абсолютно черного тела (постоянная Стефана – Больцмана).

Степень черноты углекислого газа может быть определена по выражению

$$\varepsilon_{\text{г}} = \frac{0,35 \cdot 10^{-8} (p_{\text{CO}_2} l)^{1/3}}{\sigma_0 \sqrt{T_{\text{ср}}}}, \quad (16)$$

где  $T_{\text{ср}}$  – средняя температура газа, К;  $p_{\text{CO}_2}$  – парциальное давление углекислого газа, Па;  $l$  – средняя длина пути луча, м (если рассматривать стеклопакет как плоскопараллельный слой бесконечных размеров толщиной  $\delta$ , то  $l = 1,8\delta$ ).

Так как диоксид углерода, заполняющий камеру стеклопакета, находится под атмосферным давлением и не содержит примесей, то его парциальное давление будет равно барометрическому давлению, т. е.  $p_{\text{CO}_2} \approx 10^5$  Па.

Сравнение расчетных коэффициентов теплообмена излучением для двух вариантов расчета для однокамерного стеклопакета (первый – с учетом излучения  $\text{CO}_2$ ; второй получен при предположении, что углекислый газ не влияет на тепловое излучение) приведено в табл. 2. При расчете было принято, что средняя температура газа в прослойке составляет 0 °С (273 К), разность температур на поверхностях прослойки  $\Delta t = 25$  °С (внутренняя имеет температуру 12,5 °С, наружная – минус 12,5 °С). Степень черноты наружного стекла принята  $\varepsilon_2 = 0,837$  в обоих расчетах; внутреннего  $\varepsilon_1 = 0,837$  (в первом варианте) и  $\varepsilon_1 = 0,100$  (во втором).

Сравнение расчетных коэффициентов лучистого теплообмена  
Comparison of calculated coefficients for radiant heat transfer

Толщина газовой прослойки $\delta$ , мм	Коэффициент лучистого теплообмена $\alpha_{л}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)				Величина разности коэффициента лучистого теплообмена			
	С учетом излучения CO <sub>2</sub>		Без учета излучения CO <sub>2</sub>		абсолютная, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)		относительная, %	
	При $\varepsilon_1$		При $\varepsilon_1$		При $\varepsilon_1$		При $\varepsilon_1$	
	0,837		0,100		0,837	0,100	0,837	0,100
1	3,136	3,328	0,332	0,454	0,192	0,122	5,8	26,9
2	3,131	3,328	0,332	0,454	0,197	0,122	5,9	26,9
3	3,128	3,328	0,332	0,454	0,200	0,122	6,0	26,9
4	3,125	3,328	0,332	0,454	0,203	0,122	6,1	26,9
5	3,123	3,328	0,333	0,454	0,205	0,121	6,2	26,7
6	3,121	3,328	0,333	0,454	0,207	0,121	6,2	26,7
7	3,119	3,328	0,333	0,454	0,209	0,121	6,3	26,7
8	3,118	3,328	0,333	0,454	0,210	0,121	6,3	26,7
9	3,116	3,328	0,333	0,454	0,212	0,121	6,4	26,7
10	3,115	3,328	0,333	0,454	0,213	0,121	6,4	26,7
11	3,113	3,328	0,333	0,454	0,215	0,121	6,5	26,7
12	3,112	3,328	0,333	0,454	0,216	0,121	6,5	26,7
13	3,110	3,328	0,333	0,454	0,218	0,121	6,6	26,7
14	3,110	3,328	0,333	0,454	0,218	0,121	6,6	26,7
15	3,109	3,328	0,333	0,454	0,219	0,121	6,6	26,7
16	3,108	3,328	0,333	0,454	0,220	0,121	6,6	26,7
17	3,107	3,328	0,334	0,454	0,221	0,120	6,6	26,4
18	3,106	3,328	0,334	0,454	0,222	0,120	6,7	26,4
19	3,105	3,328	0,334	0,454	0,223	0,120	6,7	26,4
20	3,104	3,328	0,334	0,454	0,224	0,120	6,7	26,4

Анализируя полученные данные, можно сделать следующий вывод: применение углекислого газа в качестве заполнения газовой прослойки стеклопакетов позволит увеличить их сопротивление теплопередаче не только за счет малого коэффициента теплопроводности, но также вследствие собственного излучения диоксида углерода, которое необходимо учитывать при расчетах.

Расчетная зависимость от толщины суммарного коэффициента теплообмена прослойки  $\alpha = \alpha_k + \alpha_l$ , заполненной CO<sub>2</sub>, представлена на рис. 3. При оптимальной толщине газовой прослойки 8 мм (табл. 1) достигаются значения:  $\alpha = 5,01$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) при  $\varepsilon_1 = 0,837$  и  $\alpha = 2,22$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) при  $\varepsilon_1 = 0,100$ .

Согласно расчетам (табл. 3), для однокамерного стеклопакета с заполнением CO<sub>2</sub> сопротивление теплопередаче может возрасти: при  $\varepsilon_1 = 0,837$  на 0,05 м<sup>2</sup>·К/Вт (до 15 %), при  $\varepsilon_1 = 0,100$  на 0,16 м<sup>2</sup>·К/Вт (до 28 %) по сравнению

со стеклопакетами, заполненными осушенным воздухом.

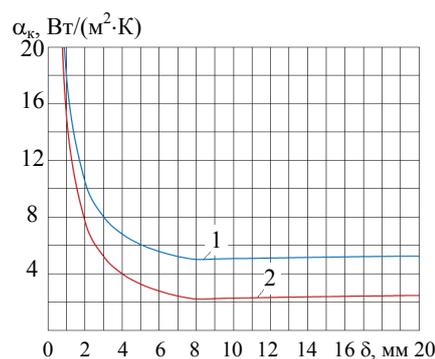


Рис. 3. Расчетные значения суммарного коэффициента теплообмена для вертикального стеклопакета, заполненного углекислым газом: 1 – при степени черноты внутреннего стекла  $\varepsilon_1 = 0,837$ ; 2 – при  $\varepsilon_1 = 0,100$

Fig. 3. Calculated values of total heat transfer coefficient for vertical insulating glass unit filled with carbon dioxide: 1 – at emissivity of inner glass  $\varepsilon_1 = 0.837$ ; 2 – at  $\varepsilon_1 = 0.100$

Сопrotивление теплопередаче заполненных углекислым газом и осушенным воздухом однокамерных стеклопакетов

Heat transfer resistance of single-chamber insulating glass units filled with carbon dioxide and dried air

Толщина газовой прослойки $\delta$ , мм	Сопrotивление теплопередаче $R_T$ , м <sup>2</sup> ·К/Вт, при $\varepsilon_1 = 0,837$ , при заполнении прослойки		$\Delta R$ , м <sup>2</sup> ·К/Вт	$\Delta R/R_T$ , %	Сопrotивление теплопередаче $R_T$ , м <sup>2</sup> ·К/Вт, при $\varepsilon_1 = 0,100$ , при заполнении прослойки		$\Delta R$ , м <sup>2</sup> ·К/Вт	$\Delta R/R_T$ , %
	CO <sub>2</sub>	воздухом			CO <sub>2</sub>	воздухом		
1	0,219	0,199	0,02	10,1	0,359	0,333	0,03	7,8
2	0,258	0,228	0,03	13,2	0,423	0,372	0,05	13,7
3	0,288	0,251	0,04	14,7	0,484	0,410	0,07	18,0
4	0,310	0,270	0,04	14,8	0,543	0,446	0,10	21,7
5	0,328	0,285	0,04	15,1	0,598	0,482	0,12	24,1
6	0,342	0,299	0,04	14,4	0,652	0,516	0,14	26,4
7	0,355	0,310	0,05	14,5	0,704	0,549	0,16	28,2
8	0,363	0,320	0,04	13,4	0,743	0,580	0,16	28,1
9	0,361	0,329	0,03	9,7	0,737	0,611	0,13	20,6
10	0,360	0,337	0,02	6,8	0,731	0,641	0,09	14,0
11	0,360	0,344	0,02	4,7	0,727	0,670	0,06	8,5
12	0,359	0,350	0,01	2,6	0,722	0,698	0,02	3,4
13	0,358	0,352	0,01	1,7	0,718	0,705	0,01	1,8
14	0,357	0,351	0,01	1,7	0,714	0,701	0,01	1,9
15	0,356	0,350	0,01	1,7	0,711	0,698	0,01	1,9
16	0,356	0,350	0,01	1,7	0,707	0,695	0,01	1,7
17	0,355	0,349	0,01	1,7	0,704	0,692	0,01	1,7
18	0,355	0,348	0,01	2,0	0,702	0,690	0,01	1,7
19	0,354	0,348	0,01	1,7	0,699	0,687	0,01	1,7
20	0,354	0,347	0,01	2,0	0,697	0,685	0,01	1,8

**Примечание.** Толщина стекол принята 4 мм.

### ВЫВОДЫ

1. При производстве и проектировании стеклопакетов необходимо стремиться к тому, чтобы толщина газовой прослойки была равна оптимальной, так как при этом достигается максимальное сопротивление теплопередаче стеклопакета. Большая толщина межстекольного пространства не приведет к сколько-нибудь значимому увеличению сопротивления теплопередаче, но увеличит расход газа.

2. Из-за особенностей конвективного теплообмена рационально делать в двухкамерных стеклопакетах внутреннее межстекольное пространство большей толщины, чем наружное.

3. Применение в качестве заполнителя газовой прослойки углекислого газа позволит увеличить сопротивление теплопередаче стеклопакетов по сравнению с заполненными осушенным воздухом при одинаковой толщине газового слоя (для однокамерного стеклопакета – на 0,05–0,16 м<sup>2</sup>·К/Вт, в зависимости от степени черноты внутреннего стекла).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-43–2006\* (02250). Введ. 01.07.2007. Минск: Минстройархитектуры, 2015. 47 с.
2. Свод правил СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция: СНиП 23-02–2003. Введ. 01.07.2013. М.: Мин-во регион. развития Рос. Федерации, 2012. 95 с.
3. Стекло в строительстве. Определение коэффициента теплопередачи (значения  $U$ ). Метод расчета: СТБ EN 673–2014. Введ. 01.03.2015. Минск: Госстандарт, 2015. 15 с.
4. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1975. 488 с.
5. Кутателадзе, С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. Справочное пособие / С. С. Кутателадзе. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
6. Schild, K. Wärmeschutz / K. Schild, W. M. Willems. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. 326 p.
7. Wright, J. L. A Correlation to Quantify Convective Heat Transfer Between Vertical Window Glazing / J. L. Wright // ASHRAE Transactions. 1996. Vol. 102, No 1. P. 940–946.
8. Варгафтик, Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Наука, 1972. 720 с.
9. Thermal Performance of Windows, Doors and Shutters. Calculation of Thermal Transmittance. Part 1: General: DIN EN ISO 10077-1:2006; German Version EN ISO 10077-1:2006. Berlin: Beutfi Verlag GmbH, 2006. 47 p.
10. Здания жилые и общественные. Нормы воздухообмена: СТО НП «АВОК» 2.1–2008. Введ. 01.06.2004. М.: НП «АВОК», 2008. 16 с.
11. Тепло- и массообмен: в 2 ч. / Б. М. Хрусталеv [и др.]; под. общ. ред. А. П. Несенчука. Минск: БНТУ, 2007. Ч. 1. 606 с.

Поступила 27.06.2017

Подписана в печать 30.08.2017

Опубликована онлайн 30.03.2018

## REFERENCES

1. Construction Design Standards ТКП 45-2.04-43–2006\* (02250). *Construction Heat Engineering*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2015. 47 (in Russian).
2. SNiP (Construction Rules and Regulations) 23-02–2003. Abridgment of Rules and Regulations СП 50.13330.2012. *Building Heat Insulation*. Moscow, Ministry of Regional Development of Russian Federation, 2012. 95 (in Russian).
3. STB [Standards of the Republic of Belarus] EN 673–2014. *Glass in Construction. Determination of Heat Transfer Ratio (value  $U$ ). Calculation Method*. Minsk, Gosstandart Publ., 2015. 15 (in Russian).
4. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. (1975) *Heat transfer*. 3<sup>rd</sup> ed. Moscow, Energia Publ. 488 (in Russian).
5. Kutateladze S. S. (1990) *Heat Transfer and Hydrodynamic Resistance. Reference Book*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 367 (in Russian).
6. Schild K., Willems W. M. (2013) *Wärmeschutz*. Wiesbaden, Springer Vieweg. 326 (in German). DOI: 10.1007/978-3-658-02571-7.
7. Wright J. L. (1996) A Correlation to Quantify Convective Heat Transfer Between Vertical Window Glazing. *ASHRAE Transactions*, 102 (1), 940–946.
8. Vargaftik N. B. (1972) *Reference Book for Thermal-Physical Properties of Gas and Liquid*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Nauka Publ. 720 (in Russian).
9. DIN EN ISO 10077-1:2006; German Version EN ISO 10077-1:2006. *Thermal Performance of Windows, Doors and Shutters. Calculation of Thermal Transmittance. Part 1: General*. Berlin, Beutfi Verlag GmbH, 2006. 47.
10. Organization Standard. Non-Commercial Partnership “AVOK” 2.1–2008. *Residential and Public Buildings. Air Exchange Standards*. Moscow, Publishing House of Non-Commercial Partnership “AVOK”, 2008. 16 (in Russian).
11. 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).

Received: 27.06.2017

Accepted: 30.08.2017

Published online: 30.03.2018