

УДК 372.8.614

канд. техн. наук Дмитриченко А.С., канд. техн. наук
Здитовецкая С.В., Мамедова С.И.*, канд. тех. наук Иванов Ю.С.**

Расчет предела огнестойкости двухкамерного стеклопакета

Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск

**Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», г. Минск*

***Учреждение «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, г. Минск*

Рассчитаны распределения температуры и напряжений в двухкамерном стеклопакете с учетом температурной зависимости теплофизических характеристик стекла, воздуха и дымовых газов, конструктивных особенностей светопрозрачной конструкции и нелинейного характера изменения температуры окружающей среды в процессе пожара. Рассчитана зависимость предела огнестойкости по критерию достижения критических напряжений в трехслойной светопрозрачной конструкции, приводящих к ее разрушению от толщины панелей.

Ключевые слова: светопрозрачная конструкция, предел огнестойкости, термическое напряжение, тепловое воздействие.

Ph.D. (tech.) A.S. Dmitrichenko, Ph.D. (tech.) S.V. Zditovetskaya,
S.I. Mamedova*, Ph.D. (tech.) Y.S. Ivanov**

Calculation of the limit of fire resistance of double-layer glass unit

Belarusian State Technological University, Minsk

**The State Education Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Minsk*

***Institution “Scientific and Research Institute of Fire Safety and Emergency Situations” of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk*

The calculation of the temperature and tension distribution in a double-layer glass unit is carried out taking into account the temperature dependence on the thermophysical characteristics of the glass, air and flue gases, and temperature dependence on the design features of the translucent structure and the non-linear nature of the change in the ambient temperature during the fire. The dependence of the fire resistance limit on the criteria of achieving critical tension in a three-layer translucent structure leading to its destruction on the thickness of the panels is calculated.

Keywords: translucent structure, limit of fire resistance, thermal tension, thermal influence.

Введение

Огнестойкость оконного остекления является важным фактором, влияющим на динамику развития пожара. При разрушении остекления происходит резкий приток воздуха в зону горения и пожар начинает интенсивно развиваться с выделением большого количества тепла, дыма и токсичных продуктов горения. Повышение огнестойкости оконного остекления позволит значительно замедлить интенсивное развитие пожара и повысить безопасность людей в здании. Достижение этой цели требует решения двух взаимосвязанных задач: изучения поведения стекла в условиях пожара и разработки научно-обоснованного метода определения требуемого предела огнестойкости стеклоконструкций.

В настоящее время для остекления оконных проемов используются стеклопакеты, состоящие из двух и более стекол, разделенных между собой промежутком, заполненным воздухом или инертным газом.

Теоретические исследования по воздействию пожара на светопрозрачные конструкции (СПК) в основном касаются разрушения одиночного стекла. В связи с этим актуальной задачей является оценка влияния конструктивных особенностей оконного профиля (материал, из которого

он изготовлен, его ширину и толщину) на огнестойкость СПК, моделирование и расчет полей температуры и напряжений, и определение пределов устойчивости двухкамерных энергосберегающих стеклопакетов в условиях огневого воздействия.

Основная часть

Двухкамерный стеклопакет представляет из себя СПК, состоящую из трех стекол, разделенных между собой двумя промежутками, заполненными воздухом или инертным газом и собранных двумя дистанционными рамками в единую герметичную систему. Стекла имеют толщину от 4 до 6 мм, а расстояния между ними различны. Для наиболее эффективного погашения шума расстояния между стеклами в одном блоке должны быть разными, то есть дистанционные рамки стеклопакета должны быть разной ширины.

Рассмотрим СПК, состоящую из трех стеклянных панелей, разделенных воздушными зазорами шириной D (рисунок 1). Каждая стеклянная панель имеет высоту $2H$ и заключена в раму шириной d . Начало координат разместим по оси симметрии панели на краю рамы, направим ось u перпендикулярно кромке рамы по направлению к центру панели, ось x перпендикулярно поверхности стеклянной панели толщиной L .

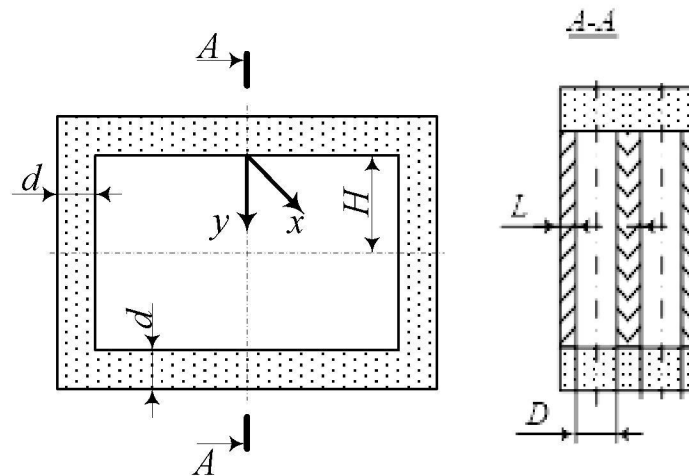


Рисунок 1. – Трехслойная светопрозрачная конструкция

В случае нестационарного теплового потока кондуктивный теплоперенос в стеклянных панелях будет описываться двухмерными

дифференциальными уравнением теплопроводности [1]. Так как задача симметричная, будем рассматривать решение для половины панели.

$$\rho(T_1)c(T_1)\frac{\partial T_1(x,y,t)}{\partial t} = \lambda(T_1)\left(\frac{\partial^2 T_1(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1(x,y,t)}{\partial y^2}\right) + I(t)\frac{\exp\left(-\frac{x}{\tilde{\gamma}}\right)}{\tilde{\gamma}}\eta(y)\eta(t-\tau_{b2})$$

при $(0 < x < L, -d < y < H, 0 < t < \tau_{b1})$; (1)

$$\rho(T_2)c(T_2)\frac{\partial T_2(x,y,t)}{\partial t} = \lambda(T_2)\left(\frac{\partial^2 T_2(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2(x,y,t)}{\partial y^2}\right) + I(t)\frac{\exp\left(-\frac{x}{\tilde{\gamma}}\right)}{\tilde{\gamma}}\eta(y)\eta(t-\tau_{b3})$$

при $(0 < x < L, -d < y < H, 0 < t < \tau_{b2})$; (2)

$$\rho(T_3)c(T_3)\frac{\partial T_3(x,y,t)}{\partial t} = \lambda(T_3)\left(\frac{\partial^2 T_3(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3(x,y,t)}{\partial y^2}\right) + I(t)\frac{\exp\left(-\frac{x}{\tilde{\gamma}}\right)}{\tilde{\gamma}}\eta(y)$$

при $(0 < x < L, -d < y < H, 0 < t < \tau_{b3})$, (3)

где $\rho(T)$ – плотность стекла, кг/м³;
 $c(T)$ – теплоемкость стекла, Дж/(кг град);
 $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности стекла, Вт/(м град);
 t – время, с;
 x, y – пространственные координаты, м;
 $T_1(x, y, t)$ – температура наружной панели;

$T_2(x, y, t)$ – температура средней панели;
 $T_3(x, y, t)$ – температура внутренней панели;
 $I(t)$ – плотность лучистого потока, поступающего на поверхность пластины, Вт/м²;
 $\tilde{\gamma}$ – длина затухания, м (величина, обратная коэффициенту поглощения);

$\eta(y)$ – единичная функция Хевисайда ($\eta(y) = 0$ при $y < 0$, $\eta(y) = 1$ при $y > 0$);

τ_{b1} – время разрушения наружной панели, с;

τ_{b2} – время разрушения средней панели, с;

τ_{b3} – время разрушения внутренней панели, обращенной к пожару ($\tau_{b1} > \tau_{b2} > \tau_{b3}$), с.

Начальное условие имеет вид:

$$T_1(x, y, 0) = T_i, \quad T_2(x, y, 0) = T_i, \quad T_3(x, y, 0) = T_i, \quad \text{при } t = 0, \quad (4)$$

Граничные условия записаны в виде:

$$-\lambda \frac{\partial T_1(0, y, t)}{\partial x} = \left[h_1(T_1(0, y, t) - T_{c1}(t)) + \varepsilon_{np} \sigma (T_1^4(0, y, t) - T_{c1}^4(t)) \right] \eta(y); \quad (5)$$

$$-\lambda \frac{\partial T_1(L, y, t)}{\partial x} = \left[h_{12}(T_2(0, y, t) - T_1(L, y, t)) + \varepsilon_{12} \sigma (T_2^4(0, y, t) - T_1^4(L, y, t)) \right] \times \\ \times \eta(y) \eta(\tau_{b2} - t) + \left[h_2(T_{c2}(t) - T_1(L, y, t)) + \varepsilon_{np} \sigma (T_{c2}^4(t) - T_1^4(L, y, t)) \right] \eta(y) \eta(t - \tau_{b2}); \quad (6)$$

$$-\lambda \frac{\partial T_2(0, y, t)}{\partial x} = \left[h_{12}(T_2(0, y, t) - T_1(L, y, t)) + \varepsilon_{12} \sigma (T_2^4(0, y, t) - T_1^4(L, y, t)) \right] \times \\ \times \eta(y) \eta(\tau_{b2} - t) + \left[h_2(T_{c2}(t) - T_1(L, y, t)) + \varepsilon_{np} \sigma (T_{c2}^4(t) - T_1^4(L, y, t)) \right] \eta(y) \eta(t - \tau_{b2}); \quad (7)$$

$$-\lambda \frac{\partial T_2(L, y, t)}{\partial x} = \left[h_{23}(T_3(0, y, t) - T_2(L, y, t)) + \varepsilon_{12} \sigma (T_3^4(0, y, t) - T_2^4(L, y, t)) \right] \times \\ \times \eta(y) \eta(\tau_{b3} - t) + \left[h_2(T_{c2}(t) - T_2(L, y, t)) + \varepsilon_{np} \sigma (T_{c2}^4(t) - T_2^4(L, y, t)) \right] \eta(y) \eta(t - \tau_{b3}); \quad (8)$$

$$-\lambda \frac{\partial T_3(0, y, t)}{\partial x} = \left[h_{23}(T_3(0, y, t) - T_2(L, y, t)) + \varepsilon_{12} \sigma (T_3^4(0, y, t) - T_2^4(L, y, t)) \right] \eta(y); \quad (9)$$

$$-\lambda \frac{\partial T_3(L, y, t)}{\partial x} = \left[h_3(T_{c2}(t) - T_2(L, y, t)) + \varepsilon_{np} \sigma (T_{c2}^4(t) - T_3^4(L, y, t)) \right] \eta(y); \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_1(x, -d, t)}{\partial y} = \frac{\partial T_1(x, H, t)}{\partial y} = \frac{\partial T_2(x, -d, t)}{\partial y} = \frac{\partial T_2(x, H, t)}{\partial y} = \frac{\partial T_3(x, -d, t)}{\partial y} = \frac{\partial T_3(x, H, t)}{\partial y} = 0, \quad (11)$$

где $h_1(T)$, $h_2(T)$ – коэффициенты конвективной теплоотдачи с поверхностей в окружающую среду, Вт/м² град;

$h_{12}(T)$ – коэффициент конвективной теплоотдачи в зазоре между панелями;

$T_{c1}(t)$, $T_{c2}(t)$, – температура окружающей среды, К;

$T_i(x)$ – начальная температура пластин, К;

ε_{np} – приведенная степень черноты системы «среда – светопрозрачная конструкция»;

ε_{12} – приведенная степень черноты системы «панель-панель»;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м² · К⁴).

Приведенная степень черноты системы «среда – светопрозрачная конструкция» определяется из соотношения

$$\varepsilon_{\text{пр}} = 1 / (1 / \varepsilon_{\text{ср}} + 1 / \varepsilon_{\text{п}} - 1), \quad (12)$$

где $\varepsilon_{\text{ср}}, \varepsilon_{\text{п}}$ – степени черноты среды и поверхности стекла.

Приведенная степень черноты системы «панель-панель» находится из соотношения

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_{\text{п}} / (2 - \varepsilon_{\text{п}}), \quad (13)$$

Температурные зависимости теплофизических характеристик стекла, воздуха и дымовых газов, конвективных коэффициентов

теплообмена и изменения температуры окружающей среды такие же, как и для однослойной СПК [2].

Для оконных стекол в диапазоне температур 0–300 °С, коэффициент линейного теплового расширения равен $\beta = 9,0 \pm 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [4]. Оценки предела прочности оконного стекла на растяжение σ_b получены в ряде экспериментальных работ по разрушению стекла [5]. В таблице приводятся механические свойства стекла и рассчитанные значения критической температуры.

Таблица – Механические свойства стекла

Коэффициент линейного теплового расширения $\beta \cdot 10^{-6}, (K^{-1})$	Предел прочности стекла на растяжение $\sigma_b \cdot 10^{-7}, (\text{Н/м}^2)$	Модуль Юнга $E \cdot 10^{-10}, (\text{Н/м}^2)$	Критическая температура $T_k, ^\circ\text{C}$
9,5	4,7	7,0	70
9,2	2,0–5,0	7,2	30–75
8,5	5,5–13,8	7,24	90–220
9,0	3,5–7,0	7	55–110

Для расчета распределения температуры в системе трех стеклянных панелей с учетом температурной зависимости теплофизических характеристик стекла, воздуха и дымовых газов, и нелинейного характера изменения температуры окружающей среды в процессе пожара разработан программный код с использованием метода конечных элементов в среде пакета FlexPDE [3].

В результате решения краевой задачи (1) – (11) были рассчитаны средние температуры в трех стеклянных панелях и зависимости от времени нагрева панелей. На рисунках 2–5 приведены зависимости от

времени температуры поверхностей системы СПК из трех вертикальных панелей высотой 1,5 м и толщиной 6 мм. Расстояние между панелями 10 мм, длина поглощения $l = 2$ мм, интенсивность падающего излучения соответственно $I = 5 \text{ кВт/м}^2, I = 10 \text{ кВт/м}^2, I = 15 \text{ кВт/м}^2$.

Как видно из приведенных зависимостей, в начале пожара и росте температуры газовой среды, начинается прогрев панели, обращенной к пожару. За счет конвективного и радиационного переноса тепла в воздушном зазоре между панелями начинает нагреваться средняя панель

и панель на необогреваемой пожаром стороне СПК.

Из зависимостей, приведенных на рисунке 2 (а), видно, что для стекла с модулем упругости $E = 7 \cdot 10^{10}$ Па и коэффициентом линейного расширения $\beta = 8,5 \cdot 10^{-6}$ (1/К) (критические напряжения $\sigma_b = 66$ МПа) первая панель, обращенная к пожару, разрушается через 119 с после начала пожара. Будем считать, что после разрушения первой панели

происходит сразу ее выпадение из рамы и на вторую панель начинает воздействовать тепловое излучение и газовая среда, нагретая пожаром. Следует

отметить, что после разрушения первой панели, ее выпадение из рамы происходит не сразу и носит вероятностный характер. Оно зависит от изменения давления среды в помещении, где происходит пожар, и от особенностей закрепления панелей в раме.

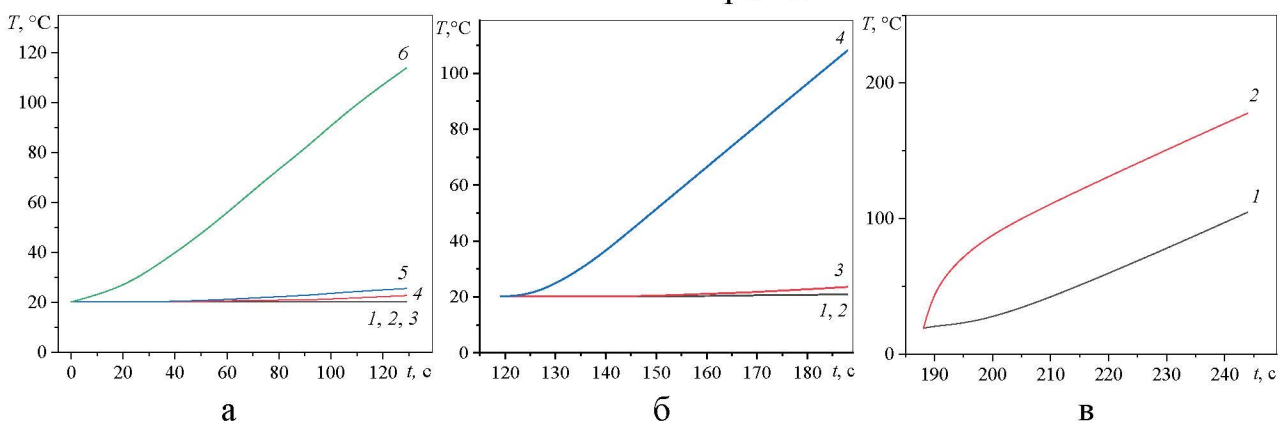


Рисунок 2. – Зависимость температуры поверхностей панелей от времени от начала возникновения пожара, до разрушения первой панели, обращенной к огневому воздействию(а), от момента разрушения первой панели до момента разрушения второй панели (б) и от момента разрушения второй панели до момента разрушения третьей панели (в) ($I = 5$ кВт/м²):

1 – необогреваемая поверхность третьей панели, 2 – обогреваемая поверхность третьей панели; 3 – необогреваемая поверхность второй панели; 4 –обогреваемая поверхность второй панели; 5 – необогреваемая поверхность первой панели; 6 – обогреваемая поверхность первой панели

Как видно из рисунка 2 (а) в момент разрушения первой панели вторая панель прогревается всего на несколько градусов (сторона, обращенная в сторону воздушного зазора и первой панели на 5,6 градуса, а сторона, обращенная в сторону третьей панели на 2,5 градуса.), третья панель практически не успевает прогреться (сторона, обращенная в сторону воздушного зазора и второй панели на 0,5 градуса, а сторона, обращенная в сторону окружающей среды на

0,2 градуса). Температура окружающей среды со стороны пожара достигает при этом 444°C. При таких начальных условиях рост температуры поверхностей второй панели происходит по зависимостям, приведенным на рисунке 2(б). Расчет показывает, что вторая панель разрушается через 69 с после разрушения первой панели. К этому времени третья панель прогревается незначительно (сторона, обращенная в сторону воздушного зазора и второй

панели на 3,8 градусов, а сторона, обращенная в сторону окружающей среды на 1,1 градус). Температура окружающей среды со стороны пожара достигает при этом 509°С. При этих начальных условиях рост температуры поверхностей третьей панели происходит по зависимостям, приведенным на рисунке 2(в). Расчет показывает, что третья панель разрушается через 56 с после разрушения второй панели.

Таким образом в данном случае при интенсивности падающего излучения $I = 5 \text{ кВт/м}^2$ светопрозрачная конструкция, состоящая из трех панелей, разрушается на 56 с позднее, чем двухпанельная СПК и на 126 с позднее, чем однопанельная СПК [6, 7].

При интенсивности падающего излучения $I = 10 \text{ кВт/м}^2$ первая

панель, обращенная к пожару, разрушается через 92 с после начала пожара. Как видно из рисунка 3 (а) в момент разрушения первой панели сторона второй панели, обращенная в сторону воздушного зазора и первой панели прогревается на 5 градусов, а сторона, обращенная в сторону третьей панели на 2 градуса, третья панель практически не успевает прогреться (сторона, обращенная в сторону воздушного зазора и второй панели на 0,05 градуса, а сторона, обращенная в сторону окружающей среды на 0,01 градуса). Температура окружающей среды со стороны пожара достигает при этом 410°С. При таких начальных условиях рост температуры поверхностей второй панели происходит по зависимостям, приведенным на рисунке 3 (б).

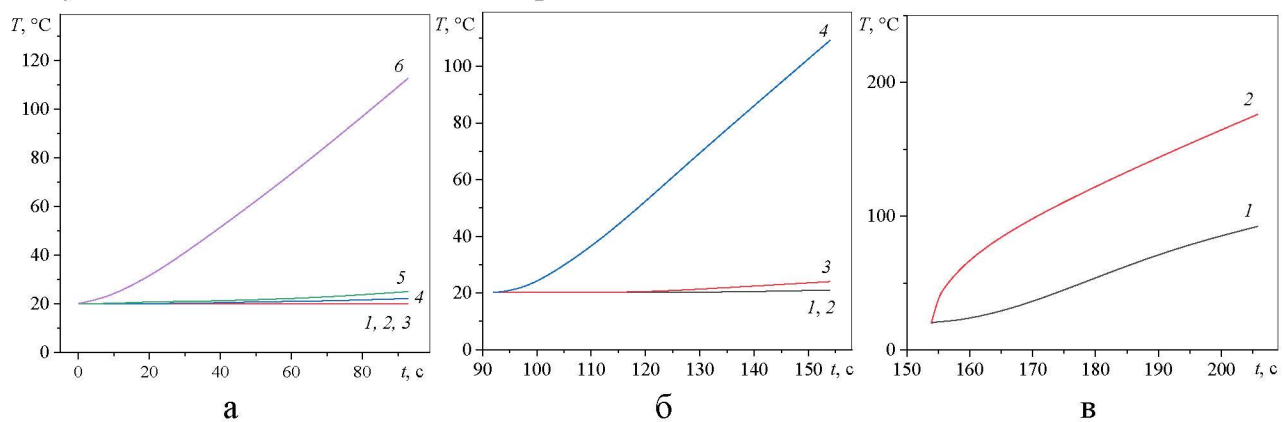


Рисунок 3. – Зависимость температуры поверхностей панелей от времени от начала возникновения пожара, до разрушения первой панели, обращенной к огневому воздействию (а), от момента разрушения первой панели до момента разрушения второй панели (б) и от момента разрушения второй панели до момента разрушения третьей панели (в) ($I = 10 \text{ кВт/м}^2$):

- 1 – необогреваемая поверхность третьей панели, 2 – обогреваемая поверхность третьей панели;
- 3 – необогреваемая поверхность второй панели; 4 – обогреваемая поверхность второй панели;
- 5 – необогреваемая поверхность первой панели;
- 6 – обогреваемая поверхность первой панели

Расчет показывает, что вторая панель разрушается через 62 с после разрушения первой панели. К этому времени третья панель прогревается

незначительно (сторона, обращенная в сторону воздушного зазора и второй панели на 3,6 градусов, а сторона, обращенная в сторону

окружающей среды на 0,96 градуса). Температура окружающей среды со стороны пожара достигает при этом 480°C. При этих начальных условиях рост температуры поверхностей третьей панели происходит по зависимостям, приведенным на рисунке 3 (в). Расчет показывает, что третья панель разрушается через 52 с после разрушения второй панели.

Таким образом в данном случае при интенсивности падающего излучения $I = 10 \text{ кВт/м}^2$ СПК, состоящая из трех панелей, разрушается на 52 с позднее, чем двухпанельная СПК и на 114 с позднее чем однопанельная СПК [6, 7].

При интенсивности падающего излучения $I = 15 \text{ кВт/м}^2$ первая панель, обращенная к пожару, разрушается через 75 с после начала

пожара. Как видно из рисунка 4 (а) в момент разрушения первой панели сторона второй панели, обращенная в сторону воздушного зазора и первой панели, прогревается на 4,4 градуса, а сторона, обращенная в сторону третьей панели, на 1,45 градуса, третья панель практически не успевает прогреться (сторона, обращенная в сторону воздушного зазора и второй панели, на 0,02 градуса, а сторона, обращенная в сторону окружающей среды, на 0,005 градуса). Температура окружающей среды со стороны пожара достигает при этом 379°C. При таких начальных условиях рост температуры поверхностей второй панели происходит по зависимостям, приведенным на рисунке 4 (б).

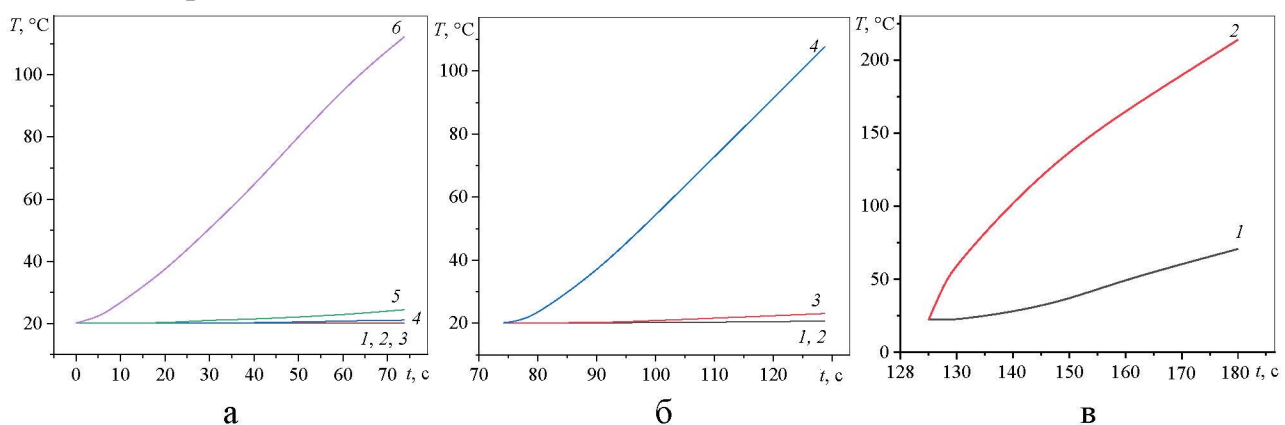


Рисунок 4. – Зависимость температуры поверхностей панелей от времени от начала возникновения пожара, до разрушения первой панели, обращенной к огневому воздействию (а), от момента разрушения первой панели до момента разрушения второй панели (б) и от момента разрушения второй панели до момента разрушения третьей панели (в) ($I = 15 \text{ кВт/м}^2$):

1 – необогреваемая поверхность третьей панели, 2 – обогреваемая поверхность третьей панели; 3 – необогреваемая поверхность второй панели; 4 – обогреваемая поверхность второй панели; 5 – необогреваемая поверхность первой панели; 6 – обогреваемая поверхность первой панели

Расчет показывает, что вторая панель разрушается через 54 с после разрушения первой панели. Температура окружающей среды со стороны

пожара достигает при этом 455°C. При этих начальных условиях рост температуры поверхностей третьей панели происходит по зависимостям,

приведенным на рисунке 4 (в). Расчет показывает, что третья панель разрушается через 51 с после разрушения второй панели.

Таким образом в данном случае при интенсивности падающего излучения $I = 15 \text{ кВт/м}^2$ светопрозрачная конструкция, состоящая из трех панелей, разрушается на 51 с позднее, чем двухпанельная СПК и на 97 с позднее чем однопанельная СПК [6, 7].

Также при решении краевой задачи (1) – (11) рассчитано время τ_b достижения критических напряжений σ_b в панелях трехслойной СПК,

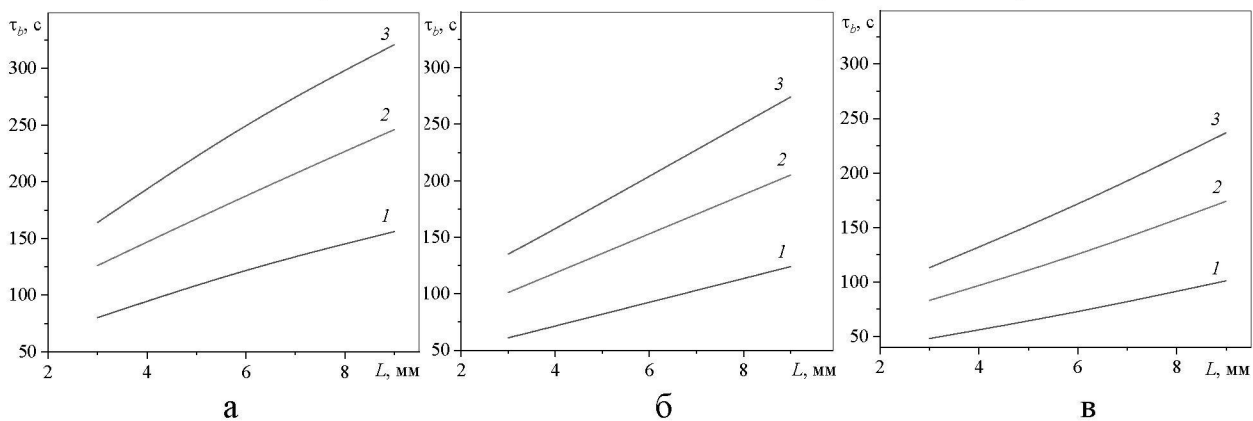


Рисунок 5. – Зависимость предела огнестойкости по критерию достижения критических напряжений в панели при $I = 5 \text{ кВт/м}^2$ (а), $I = 10 \text{ кВт/м}^2$ (б), $I = 15 \text{ кВт/м}^2$:

1 – время наступления разрушения двухслойной панели; 2 – время наступления разрушения трехслойной панели.

Как видно из приведенных зависимостей, время наступления разрушения СПК возрастает с увеличением толщины панели и уменьшается с увеличением интенсивности излучения. Предел огнестойкости двухслойной СПК больше предела огнестойкости однослойной СПК, а предел огнестойкости трехслойной СПК больше предела огнестойкости и двухслойной СПК.

Для СПК с толщиной панелей 6 мм при интенсивности излучения $I = 5 \text{ кВт/м}^2$ времена разрушения

приводящих к ее разрушению (предельное состояние по критерию целостности E) при вариации параметров модели. При этом половина ширины панели $H = 0,75 \text{ м}$, расстояние между панелями – 2 см, длина поглощения $l = 2 \text{ мм}$, критическая температура $T_k = 110^\circ\text{C}$.

На рисунке 5 показана зависимость предела огнестойкости τ_b по критерию достижения критических напряжений в трехслойной, двухслойной и однослойной СПК, приводящих к ее разрушению, от толщины панелей L при разной интенсивности излучения пожара.

однослойной, двухслойной и трехслойной СПК составляют соответственно 125 с, 188 с и 253 с, при интенсивности излучения $I = 10 \text{ кВт/м}^2$ соответственно – 92 с, 153 с и 206 с, при интенсивности излучения $I = 15 \text{ кВт/м}^2$ соответственно – 72 с, 124 с и 170 с.

Заключение

С помощью разработанного программнокода с использованием пакета FlexPDE рассчитаны средние температуры трех стеклянных

панелей в зависимости от времени нагрева с учетом температурной зависимости теплофизических характеристик стекла, воздуха и дымовых газов, конструктивных особенностей светопрозрачной конструкции и нелинейного характера изменения температуры окружающей среды в процессе пожара. Показано, что в трехслойной СПК панель, обращенная к пожару, разрушается быстрее, чем при таких же условиях происходит разрушение панели, обращенной к пожару в двухслойной СПК.

Рассчитана зависимость предела огнестойкости по критерию достижения критических напряжений в трехслойной панели, приводящих к ее разрушению от толщины панелей. Показано, что время наступления разрушения возрастает с увеличением толщины панелей и уменьшается с увеличением радиационного теплового потока, воздействующего на СПК.

Литература

1. Pagni, P. J. Thermal Glass Breakage / P. J. Pagni // Fire Safety Science – Proceedings of the Seventh International Symposium, eds.: D. Evans [et al.]. – Gaithersburg, USA. –2002. – P. 3–25.

2. Исследование термонапряженного состояния светопрозрачной конструкции при огневом воздействии / А. С. Дмитриченко [и др.] // Труды БГТУ. – Серия 3. Физ.-матем. наук. – 2018.– № 2. – С. 76–81.

3. FlexPDE finite element model builder for Partial Differential Equations [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.pdesolutions.com> (дата обращения 15.01.2020).

4. Bansal, N.P. Handbook of Glass Properties / N.P. Bansal, R.H. Doremus. – NY.: Academic Press Inc., 1986. – 680 p.

5. Fletcher, D. Q. Mechanics of Materials / D. Q. Fletcher. – NY.: Holt. Reinhart and Winston, 1985. – 474 p.

6. Расчет предела огнестойкости однослойного стеклопакета / А. С. Дмитриченко [и др.] // Вестник УГЗ. – Т. 3. – 2019. – № 2. С. 117 – 126.

7. Расчет предела огнестойкости светопрозрачной конструкции по критериям целостности и теплоизоляции / А. С. Дмитриченко [и др.] // Труды БГТУ. – Серия 2. Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2019.– № 2. – С. 25 – 31.

References

1. Pagni, P. J. Thermal Glass Breakage / P. J. Pagni // Fire Safety Science – Proceedings of the Seventh International Symposium, eds.: D. Evans [et al.]. – Gaithersburg, USA. –2002. – P. 3–25.

2. Issledovanie termonapryazhen-nogo sostoyaniya svetoprozrachnoj konstrukcii pri ognevom vozdejstvii / А. S. Dmitrichenko [i dr.] // Trudy BGTU. – Seriya 3. Fiz.-matem. nauk. – 2018.– № 2. – S. 76–81.

3. FlexPDE finite element model builder for Partial Differential Equations [Elektronnyj resurs]. – URL: <http://www.pdesolutions.com> (dataobrashcheniya 15.01.2020).

4. Bansal, N.P. Handbook of Glass Properties / N.P. Bansal, R.H. Doremus. – NY.: Academic Press Inc., 1986. – 680 p.

5. Fletcher, D. Q. Mechanics of Materials / D. Q. Fletcher. – NY.: Holt. Reinhart and Winston, 1985. – 474 r.

6. Raschet predela ognestojkosti odnoslojnogo steklopaketa / A. S. Dmitrichenko [i dr.] // Vestnik UGZ. – T. 3. – 2019. – № 2. S. 117 – 126.

7. Raschet predela ognestojkosti svetoprozrachnoj konstrukcii po

kriteriyam celostnosti i teploizolyacii / A. S. Dmitrichenko [i dr.] // Trudy BGTU. –

8. Seriya 2. Himicheskie tekhnologii, biotekhnologiya, ge-oekologiya. – 2019. – № 2. – S. 25 – 31.

