

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.300>

УДК 614.841.332

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА ОКОННОГО ПРОФИЛЯ НА ОДНОСЛОЙНУЮ СТЕКЛЯННУЮ ПАНЕЛЬ В УСЛОВИЯХ СТАНДАРТНОГО ОГНЕВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Дмитриченко А.С., Здитовецкая С.В., Мамедова С.И.

*Цель.* Разработать методику расчета огнестойкости однослойной плоской стеклянной панели, заключенной в раму, в условиях стандартного огневого воздействия при различных пожарных нагрузках с учетом конструктивных особенностей рамы и теплофизических свойств воздуха, дымовых газов и рамы.

*Методы.* Расчеты распределения температуры и напряжений ограниченной стеклянной панели выполняются численно с использованием программного пакета FlexPDE.

*Результаты.* Рассчитано распределение температуры и напряжений в однослойной плоской стеклянной панели, заключенной в оконный профиль, с учетом температурной зависимости теплофизических характеристик стекла, воздуха и дымовых газов, конструктивных особенностей светопрозрачной конструкции и нелинейного характера изменения температуры окружающей среды при пожаре. Исследовано влияние материала оконного профиля на разрушение однослойной плоской стеклянной панели, заключенной в раму, в условиях стандартного огневого воздействия при различных пожарных нагрузках.

*Область применения исследований.* Результаты исследования могут быть использованы при проектировании зданий и сооружений с целью обеспечения безопасной эксплуатации и эвакуации в случае пожара.

*Ключевые слова:* светопрозрачная конструкция, коэффициент теплоотдачи, термическое напряжение, тепловое воздействие, огнестойкость.

(Поступила в редакцию 30 июня 2021 г.)

### Введение

Разрушение ограждающих светопрозрачных конструкций (СПК) оказывает существенное влияние на динамику развития пожара. При разрушении СПК и вскрытии проемов происходит резкий приток воздуха в зону горения, что способствует резкому нарастанию опасных факторов пожара. До настоящего времени теоретические исследования воздействия пожара на СПК в основном касались разрушения одиночного стекла, поэтому актуальной задачей является оценка влияния конструктивных особенностей оконного профиля (материал, из которого он изготовлен, его ширина и толщина) на огнестойкость СПК, моделирование и расчет полей температуры и напряжений в условиях огневого воздействия.

### Основная часть

Рассмотрим стеклянную панель высотой  $h_z$ , шириной  $2h_x$  и толщиной  $2h_y$ , заключенную в раму высотой  $L_z$ , шириной  $2L_x$  и толщиной  $2L_y$ , кромка рамы, в которую заключена панель, имеет размер  $L_s/2$ . Начало координат разместим в центре нижней поверхности рамы и направим ось  $z$  перпендикулярно нижней поверхности рамы, ось  $x$  параллельно нижней поверхности рамы, ось  $y$  направлена перпендикулярно поверхности стеклянной панели (рис. 1).

Разделим объем, занимаемый рамой с заключенной в ней стеклянной панелью, на пять слоев. Первый слой отсекается плоскостью  $z = L_s/2$ , второй слой – плоскостью  $z = L_s$ , третий слой – плоскостью  $z = L_z - L_s$ , четвертый и пятый слой – плоскостью  $z = L_z - L_s/2$ , нижняя поверхность рамы имеет координату  $z = 0$ , верхняя поверхность рамы имеет координату  $z = L_z$ .

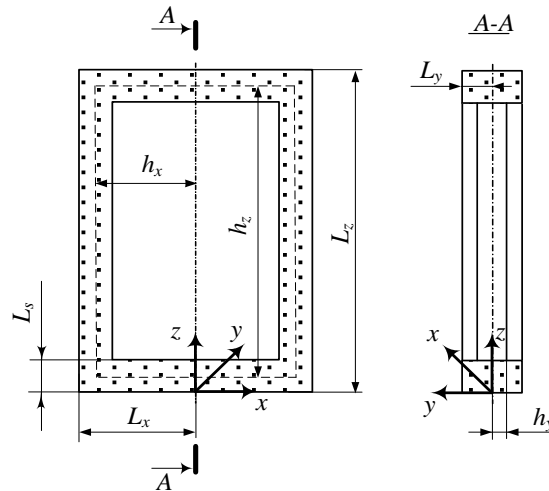


Рисунок 1. – Стеклопанель, заключенная в раму

Температурное поле в стеклянной панели будет описываться трехмерным дифференциальным уравнением теплопроводности [1];

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \lambda(T)\left(\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2}\right) + I(x, z, t)\frac{e^{-y/\gamma}}{\gamma} f(x, z) \quad \text{при } -h_x < x < h_x, \quad -h_y < y < h_y, \quad L_s/2 < z < h_z; \quad (1)$$

$$f(x, z) = [\eta(x - L_s + L_x) - \eta(x - L_x + L_s)][\eta(z - L_s) - \eta(z - L_z + L_s)], \quad (2)$$

где  $\rho(T)$  – плотность стекла, кг/м<sup>3</sup>;  $c(T)$  – теплоемкость стекла, Дж/(кг · К);  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности стекла, Вт/(м · К);  $T(x, y, z, t)$  – температура, К;  $x, y, z$  – пространственные координаты, м;  $t$  – время, с;  $I(x, z, t)$  – плотность лучистого потока, поступающего на поверхность пластины, Вт/м<sup>2</sup>;  $\gamma$  – длина затухания (величина, обратная коэффициенту поглощения), м;  $\eta(x), \eta(z)$  – единичные функции Хевисайда.  $f(x, z)$  – двумерная единичная функция, значение которой равно нулю на плоскости XZ, затененной рамой, и единице во всех других точках плоскости XZ.

Начальное условие имеет вид:

$$T(x, y, z, 0) = T_i \quad \text{при } t = 0, \quad (3)$$

где  $T_i$  – начальная температура пластины, К.

Граничные условия имеют вид:

$$-\lambda \frac{\partial T(x, -h_y, z, t)}{\partial y} = \left[ h_1 (T(x, -h_y, z, t) - T_{c1}(t)) + \varepsilon_{\text{пр}} \sigma (T^4(x, -h_y, z, t) - T_{c1}^4(t)) \right] f(x, z) \quad \text{при } y = h_y, \quad L_s - L_x < x < L_x - L_s, \quad L_s < z < L_z - L_s; \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(x, h_y, z, t)}{\partial y} = \left[ h_2 (T(x, h_y, z, t) - T_{c2}(t)) + \varepsilon_{\text{пр}} \sigma (T^4(x, h_y, z, t) - T_{c2}^4(t)) \right] f(x, z) \quad \text{при } y = -h_y, \quad L_s - L_x < x < L_x - L_s, \quad L_s < z < L_z - L_s, \quad (5)$$

где  $h_1(T), h_2(T)$  – коэффициенты конвективной теплоотдачи с поверхностями стеклянной панели, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $T_{c1}(t), T_{c2}(t)$  – температура окружающей среды с двух сторон стеклянной панели, К;  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты системы среда – светопрозрачная конструкция;  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>)).

Приведенная степень черноты системы среда – светопрозрачная конструкция:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1/\varepsilon_{\text{сп}} + 1/\varepsilon_{\text{с}} - 1}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{\text{сп}}$  – степень черноты среды;  $\varepsilon_{\text{с}}$  – степень черноты поверхности стекла.

Температурное поле в раме будет описываться трехмерным дифференциальным уравнением теплопроводности [2]:

$$\rho_1(T_1)c_1(T_1)\frac{\partial T_1(x, y, z, t)}{\partial t} = \lambda_1(T_1)\left(\frac{\partial^2 T_1(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1(x, y, z, t)}{\partial z^2}\right),$$

при  $-L_x < x < L_x, -L_y < y < L_y, 0 < z < L_z,$  (7)

где  $\rho_1(T_1)$  – плотность материала рамы, кг/м<sup>3</sup>;  $c_1(T_1)$  – теплоемкость материала рамы, Дж/(кг · К);  $\lambda_1(T_1)$  – коэффициент теплопроводности материала рамы, Вт/(м · К);  $T_1(x, y, z, t)$  – температура рамы, К.

Начальное условие имеет вид:

$$T_1(x, y, z, 0) = T_i \quad \text{при } t = 0, \quad (8)$$

где  $T_i$  – начальная температура рамы, К.

Граничные условия имеют вид:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T(x, -L_y, z, t)}{\partial y} = \left[ h_{11} (T(x, -L_y, z, t) - T_{c1}(t)) + \varepsilon_{\text{пр}1} \sigma (T_1^4(x, -L_y, z, t) - T_{c1}^4(t)) \right] + I(x, z, t)$$

при  $y = -L_y, -L_x < x < L_x, 0 < z < L_z;$  (9)

$$-\lambda_1 \frac{\partial T(x, L_y, z, t)}{\partial y} = \left[ h_{21} (T(x, L_y, z, t) - T_{c2}(t)) + \varepsilon_{\text{пр}1} \sigma (T_1^4(x, L_y, z, t) - T_{c2}^4(t)) \right] + I(x, z, t)$$

при  $y = L_y, -L_x < x < L_x, 0 < z < L_z;$  (10)

где  $h_{11}(T_1), h_{21}(T_1)$  – коэффициенты конвективной теплоотдачи с поверхностями рамы, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $\varepsilon_{\text{пр}1}$  – приведенная степень черноты системы среда – рама;  $I(x, z, t)$  – плотность лучистого потока, поступающего на поверхность рамы, Вт/м<sup>2</sup>.

Приведенная степень черноты системы среда – рама:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1/\varepsilon_{\text{сп}} + 1/\varepsilon_{\text{п}} - 1}, \quad (11)$$

где  $\varepsilon_{\text{сп}}$  – степень черноты среды;  $\varepsilon_{\text{п}}$  – степень черноты поверхности рамы.

На торцевых поверхностях рамы примем температуру равной начальной. Будем считать, что тепловые потоки и температуры на стыках поверхностей стеклянной панели и рамы равны друг другу.

Коэффициент конвективного теплообмена от среды, нагреваемой пожаром,  $h_2(T(x, -h_y, z, t), T_{c2}(t))$ , меняется с изменением температуры дымовых газов и температуры обогреваемой поверхности пластины, коэффициент конвективного теплообмена от необогреваемой поверхности пластины и окружающим воздухом  $h_1(T(x, h_y, z, t), T_{c1}(t))$  меняется с ростом температуры необогреваемой поверхности. Нестационарность процессов теплообмена при развитии пожара значительно затрудняет расчеты, критериальные уравнения для коэффициентов теплообмена при нестационарном процессе в большинстве случаев отсутствуют. Однако при определенных условиях конвективного теплообмена пограничный слой

быстро реагирует на внешние возмущения и успевает перестроиться при изменении температуры среды, воздействующей на поверхность и на изменение температуры самой поверхности. В этом случае в каждый момент времени существуют как бы мгновенные стационарные условия и для определения интенсивности процесса может быть использован квазистационарный подход [3].

Средний коэффициент теплоотдачи для вертикальной поверхности высотой  $H$  с учетом ламинарного и турбулентного режимов в широком диапазоне изменения параметров  $Pr = 0,022-7640$ ,  $Ra_H = 10^{-4} - 10^{15}$  можно определить по формулам (12)–(16) [4]:

$$h_1 = \frac{Nu_{cp,b} \lambda_b}{H}, \quad h_2 = \frac{Nu_{cp,r} \lambda_r}{H}, \quad (12)$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К);  $H$  – высота стеклянной панели, м. Индексы:  $b$  – воздух;  $r$  – дымовые газы.

Критерий Нуссельта рассчитывается по формуле:

$$Nu_{cp,b}^{1/2} = 0,825 + \frac{0,387 Ra_{H,b}^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr_b}\right)^{9/16}\right]^{8/27}}, \quad Nu_{cp,r}^{1/2} = 0,825 + \frac{0,387 Ra_{H,r}^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr_r}\right)^{9/16}\right]^{8/27}}, \quad (13)$$

где  $Ra$  – критерий Рэлея.

Критерий Рэлея рассчитывается по формуле:

$$Ra_{H,b} = Gr_{H,b} Pr_b, \quad Ra_{H,r} = Gr_{H,r} Pr_r, \quad (14)$$

где  $Pr$  – критерий Прандтля;  $Gr$  – критерий Грасгофа.

При этом критерий Грасгофа вычисляется по формулам:

$$Gr_{H,b} = \frac{g \beta_t (T_\infty - T_n) H^3}{\nu_b^2}, \quad Gr_{H,r} = \frac{g \beta_t (T_\infty - T_n) H^3}{\nu_r^2}, \quad (15)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $\beta_t = 1/T$  – термический коэффициент объемного расширения, К<sup>-1</sup>;  $T_\infty$  – температура окружающей среды, К;  $T_n$  – температура поверхности панели, К;  $H$  – высота стеклянной панели, м;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с.

Критерий Прандтля для воздуха находится из следующего соотношения:

$$Pr_b = \frac{\nu_b}{a_b}, \quad Pr_r = \frac{\nu_r}{a_r}, \quad (16)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с.

Теплофизические и динамические параметры берутся при температуре

$$T_{cp} = (T_\infty + T_n)/2. \quad (17)$$

Свойства воздуха и дымовых газов при разных температурах, приведенные в таблицах [5], аппроксимированы полиномами второй степени и имеют следующий вид:

$$\lambda_b(T) = 0,02428 + 8,120878 \cdot 10^{-5} \cdot T - 2,971432 \cdot 10^{-8} \cdot T^2, \quad (18)$$

$$\nu_b(T) = 1,319498 \cdot 10^{-5} + 9,118545 \cdot 10^{-8} \cdot T + 8,279991 \cdot 10^{-11} \cdot T^2, \quad (19)$$

$$Pr_b(T) = 0,707193 - 2,040537 \cdot 10^{-4} \cdot T + 3,26627 \cdot 10^{-7} \cdot T^2, \quad (20)$$

$$\lambda_r(T) = 0,022854 + 8,499151 \cdot 10^{-5} \cdot T + 9,64936 \cdot 10^{-10} \cdot T^2, \quad (21)$$

$$v_r(T) = 1,10659 \cdot 10^{-5} + 9,905 \cdot 10^{-8} \cdot T + 6,376374 \cdot 10^{-11} \cdot T^2, \quad (22)$$

$$Pr_r(T) = 0,71022 - 1,88012 \cdot 10^{-4} \cdot T + 5,594406 \cdot 10^{-8} \cdot T^2. \quad (23)$$

Теплофизические характеристики образцов оконного стекла исследовались в интервале температур 25–500 °С на приборе LFA 457 MicroFlash фирмы NETZSCH [6] методом лазерной вспышки [7]. Зависимость коэффициента теплопроводности, теплоемкости и коэффициента температуропроводности оконного стекла от температуры может быть аппроксимирована полиномами второй степени:

$$\lambda = 0,718899 + 1,541745 \cdot 10^{-3} \cdot T - 1,39502 \cdot 10^{-6} \cdot T^2, \quad (24)$$

$$c = 676,580017 + 2,699688 \cdot T - 2,790412 \cdot 10^{-3} \cdot T^2, \quad (25)$$

$$a = 4,378452 \cdot 10^{-7} - 4,179546 \cdot 10^{-10} \cdot T + 5,629294 \cdot 10^{-13} \cdot T^2. \quad (26)$$

Теплофизические свойства для материалов, из которых изготавливается оконный профиль, приведены в таблице 1 [8, с. 224, 304, 318].

**Таблица 1. – Теплофизические свойства материалов для изготовления оконного профиля**

Материал	Плотность $\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость $c_1$ , Дж/(кг·К)	Коэффициент теплопроводности $\lambda_1$ , Вт/(м·К)
ПВХ	1400	1200	0,19
Алюминий	2600	920	160
Стеклопластик	1800	1400	0,75
Дерево	500	2700	0,15

Для оконных стекол в диапазоне температур 0–300 °С коэффициент линейного теплового расширения равен  $\beta = (9,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  [9]. Оценки предела прочности оконного стекла на растяжение  $\sigma_b$  получены в ряде экспериментальных работ по разрушению стекла [10]. В таблице 2 приводятся механические свойства стекла и рассчитанные значения критической температуры  $T_k = \sigma_b / (\beta E)$ .

**Таблица 2. – Механические свойства стекла**

Коэффициент линейного теплового расширения $\beta \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup>	Предел прочности стекла на растяжение $\sigma_b \cdot 10^{-7}$ , Па	Модуль Юнга $E \cdot 10^{-10}$ , Па	Критическая температура $T_k$ , К
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	90–224
9,0	3,5–7,0	7	55–110

Среднеобъемную температуру помещения при пожаре  $T_{c2}(t)$  зададим с помощью стандартной кривой пожара

$$T_{п}(t) = 345 \cdot \lg(kt + 1) + T_0, \quad k = 0,133 \text{ с}^{-1}, \quad (27)$$

где  $T_{п}(t)$  – температура пожара, К;  $T_0$  – начальная температура пожара, К;  $t$  – время пожара, с.

Для расчета распределения температуры в стеклянной панели, заключенной в раму с учетом температурной зависимости теплофизических характеристик стекла, воздуха и дымовых газов и нелинейного характера изменения температуры окружающей среды в процессе пожара методом конечных элементов в среде пакета FlexPDE [11] был разработан программный код решения краевой задачи (1)–(26) методом конечных элементов.

С помощью разработанного программного кода были рассчитаны профили температуры в стеклянной оконной панели и оконном профиле, зависимости от времени изменения температуры на обогреваемой и необогреваемой поверхностях панели.

На рисунке 2 приведено распределение температуры по толщине алюминиевого и деревянного профилей и стеклянной панели, заключенной в них. Из приведенных зависимостей видно, что стеклянная панель прогревается сильнее под более теплопроводным алюминиевым профилем. Интенсивность падающего излучения  $I = 10 \text{ кВт/м}^2$ , длина поглощения  $\gamma = 2 \text{ мм}$ . Для проведения расчетов примем следующие численные значения:  $L_y = 30 \text{ мм}$ ,  $L_y = 10 \text{ мм}$ ,  $h_y = 2,5 \text{ мм}$ ,  $h_x = 0,5 \text{ м}$ ,  $h_z = 1,2 \text{ м}$  в момент времени  $t = 200 \text{ с}$ .

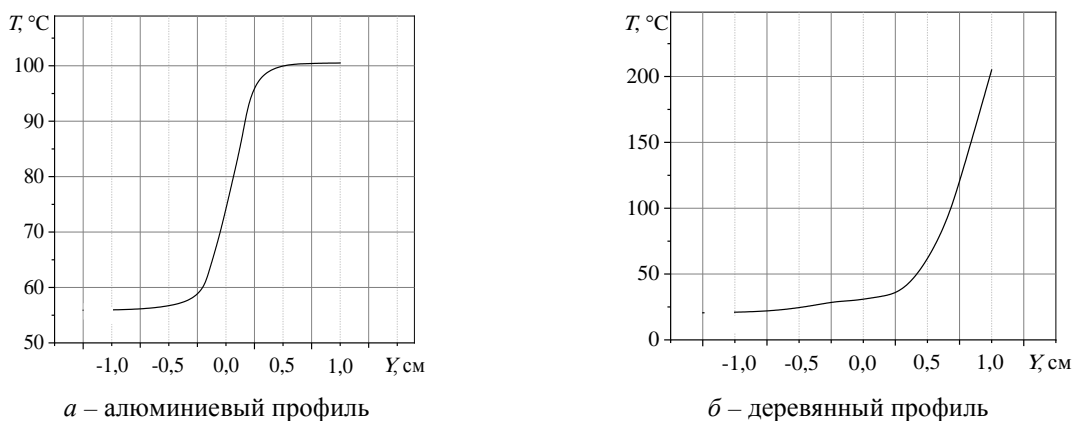


Рисунок 2. – Распределение температуры по толщине оконного профиля

На рисунке 3 показаны зависимости разности температур центральной части стеклянной панели  $T(z)$  и ее края от высоты стеклянной панели, при разной толщине профиля в момент времени  $t = 200 \text{ с}$ . Как видно из приведенных зависимостей, перегрев центральной части панели относительно ее края тем больше, чем шире и толще профиль. Разность температур центральной части стеклянной панели и ее края больше для панели, заключенной в деревянную раму. Интенсивность падающего излучения  $I = 10 \text{ кВт/м}^2$ , длина поглощения  $\gamma = 2 \text{ мм}$ . Для проведения расчетов примем следующие численные значения:  $h_y = 2,5 \text{ мм}$ ,  $h_z = 1,2 \text{ м}$  в момент времени  $t = 200 \text{ с}$ .

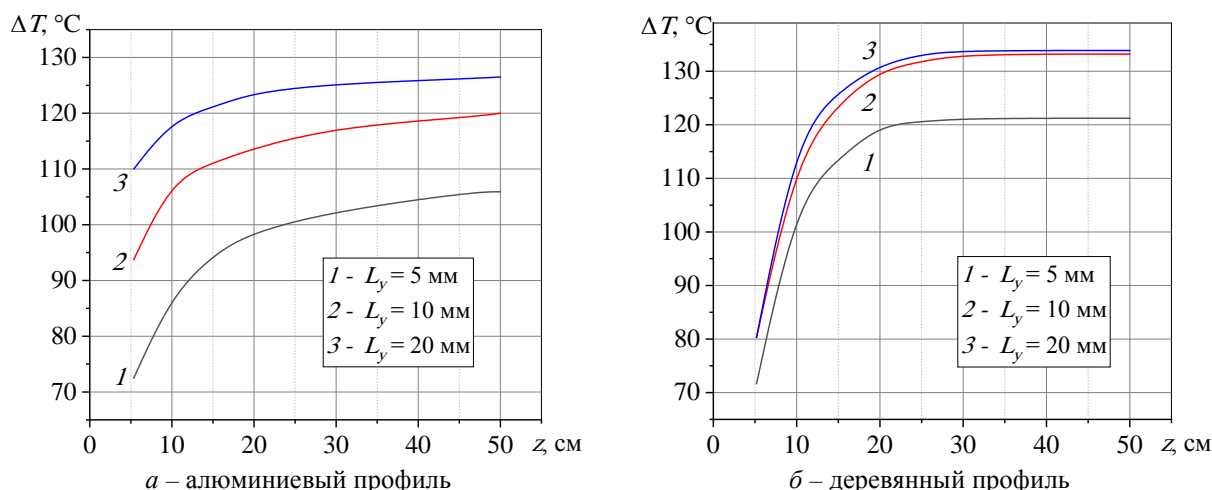


Рисунок 3. – Зависимость разности температур центральной части стеклянной панели и ее края от высоты стеклянной панели

В работе [12] предложен метод расчета огнестойкости стеклянной панели по критерию достижения критических напряжений. Показано, что температура стекла при воздействии на него тепловой нагрузки в центральной части панели повышается быстрее, чем в части, закрытой рамой. Следовательно, центральная часть стеклянной панели расширяется

быстрее, чем края, и там возникают растягивающие напряжения. Проведенные эксперименты [12; 13] показывают, что первоначальное разрушение стеклянной панели при пожаре происходит на ее краях. Стекло разрушается в момент времени  $\tau_b$ , когда разность температур центральной части панели и ее края достигает критического значения  $T_k$ , приводящего к возникновению напряжений, превосходящих предел прочности стекла при растяжении:

$$\Delta T(-L_s, \tau_b) = \frac{\sigma_b}{E\beta} = T_k, \quad (28)$$

где  $T_k$  – критическая температура перегрева центральной части панели относительно ее края, приводящая к возникновению критических напряжений  $\sigma_b$ , вызывающих разрушение стекла.

Принимая во внимание механические свойства стекла (табл. 2), получим, что при коэффициенте линейного теплового расширения стекла  $\beta = (9 \pm 0,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , модуле упругости  $E = 72 \text{ ГПа}$ , пределе прочности оконного стекла на растяжение  $20 \text{ МПа} < \sigma_b < 138 \text{ МПа}$  критическая температура перегрева центральной части панели относительно ее края лежит в диапазоне  $30 \text{ К} < T_k < 224 \text{ К}$ .

Зависимость предела огнестойкости  $\tau_b$  по критерию достижения критических напряжений в панели, приводящих к ее разрушению от критической температуры  $T_k$  при разной интенсивности радиационного теплового потока  $I$ , поступающего на поверхность панели для алюминиевого, пластикового и деревянного оконного профиля одинакового размера, показана на рисунке 4. Для проведения расчетов примем численные значения, приведенные к рисунку 2. Длина поглощения  $l = 2 \text{ мм}$ .

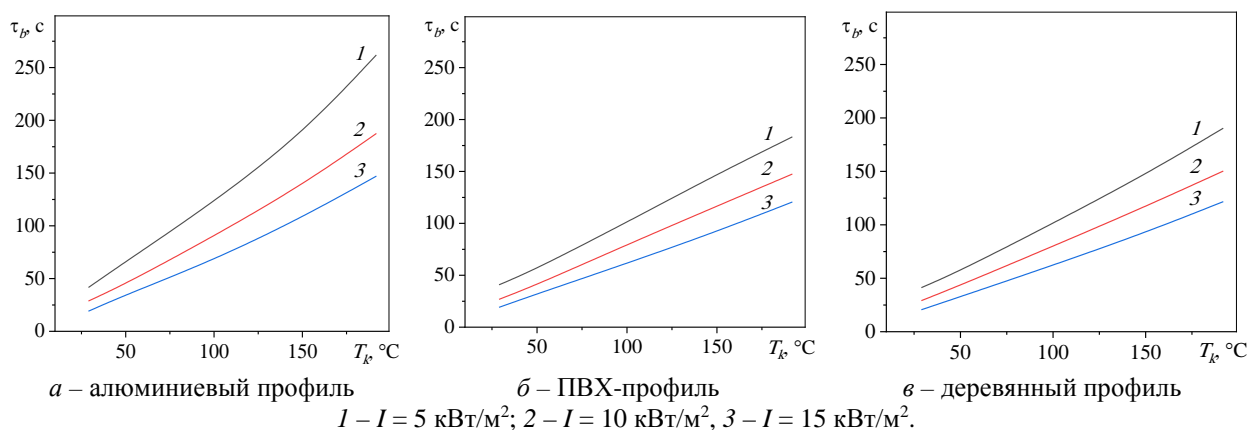


Рисунок 4. – Зависимость предела огнестойкости по критерию достижения критических напряжений в стеклянной панели от критической температуры

Как видно из приведенных зависимостей, время разрушения панели увеличивается с увеличением критической температуры (критических напряжений) и тем меньше, чем больше интенсивность радиационного теплового потока.

Зависимость предела огнестойкости по критерию достижения критических напряжений в стеклянной панели от критической температуры для разных материалов оконного профиля (алюминий, ПВХ, дерево) показана на рисунке 5. Для проведения расчетов примем численные значения, приведенные к рисунку 2. Длина поглощения  $l = 2 \text{ мм}$ , интенсивность падающего излучения  $I = 10 \text{ кВт/м}^2$ .

Из приведенных зависимостей видно, что время разрушения панели увеличивается с увеличением критической температуры (критических напряжений) и тем меньше, чем больше интенсивность радиационного теплового потока. Время разрушения оконной панели, заключенной в раму из алюминия, превышает время разрушения панели, заключенной в раму из ПВХ или дерева. Этот факт объясняется тем, что алюминий имеет теплопроводность, значительно превышающую теплопроводность пластика и дерева. Поэтому стекло

под алюминиевым профилем прогревается больше, чем под ПВХ или деревом, следовательно, необходимо больше времени, чтобы разность температур края стекла и его центра достигли критических значений. Пределы огнестойкости панелей из ПВХ и дерева одинаковой толщины и ширины незначительно отличаются друг от друга, т.к. их теплофизические свойства близки.

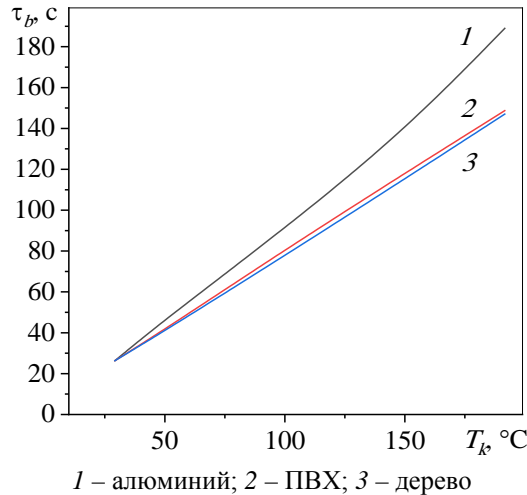


Рисунок 5. – Зависимость предела огнестойкости по критерию достижения критических напряжений в стеклянной панели от критической температуры для разных материалов оконного профиля

### Заключение

На основе разработанного программного кода с использованием пакета FlexPDE рассчитаны профили температуры однослойной плоской стеклянной панели, заключенной в оконный профиль с учетом температурной зависимости теплофизических характеристик стекла, воздуха и дымовых газов, конструктивных особенностей светопрозрачной конструкции и нелинейного характера изменения температуры окружающей среды при пожаре. Учет конструктивных характеристик оконного профиля (его размеры и материал) влияет на распределение температуры в стеклянной панели в области ее затенения оконным профилем. Прогрев затененной зоны тем меньше, чем больше ширина и толщина оконного профиля и более теплопроводен материал, из которого оконный профиль изготовлен.

Рассчитана зависимость предела огнестойкости по критерию достижения критических напряжений в панели, приводящих к ее разрушению, от критической температуры при разной интенсивности радиационного теплового потока, поступающего на поверхность панели для алюминиевого, пластикового и деревянного оконного профиля. Показано, что время разрушения панели увеличивается с увеличением критической температуры (критических напряжений) и тем меньше, чем больше интенсивность радиационного теплового потока. Время разрушения оконной панели, заключенной в раму из алюминия, превышает время разрушения панели, заключенной в раму из ПВХ или дерева. Это обусловлено более высокой теплопроводностью алюминия, превышающей теплопроводность пластика и дерева. Для панелей из ПВХ и дерева одинаковой толщины и ширины пределы огнестойкости незначительно отличаются друг от друга, т.к. теплофизические свойства этих материалов близки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Pagni, P.J. Thermal Glass Breakage / P.J. Pagni // Fire Safety Science – Proceedings of the Seventh International Symposium. – Gaithersburg, USA. – 2002. – P. 3–22.
2. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
3. Прохач, Э.И. Об использовании квазистационарного подхода в расчетах конвективного теплообмена / Э.И. Прохач // Инженерно-физический журнал. – 1976. – Т. 31, № 5. – С. 857–860.



4. Гусев, С.Е. Свободно-конвективный теплообмен при внешнем обтекании тел / С.Е. Гусев, Г.Г. Шкловер. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 166 с.
5. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
6. Приборы термического анализа группы NETZSCH [Электронный ресурс] // Products & Solutions – NETZSCH Analyzing & Testing. – Режим доступа: <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products-solutions/thermal-diffusivity-conductivity/>. – Дата доступа: 20.01.2021.
7. Parker, W.J. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity / W.J. Parker, R.J. Jenkins, C.P. Butler // *Journal of Applied Physics*. – 1961. – Vol. 32, No. 9. – P. 1675–1684.
8. Чиркин, В.С. Теплопроводность промышленных материалов / В.С. Чиркин. – М.: Машгиз, 1962. – 247 с.
9. Bansal, N.P. Handbook of Glass Properties / N.P. Bansal, R.H. Doremus. – New York: Academic Press Inc., 1986. – 680 p.
10. Fletcher, D.Q. Mechanics of Materials / D.Q. Fletcher. – New York: Holt. Reinhart and Winston, 1985. – 474 p.
11. FlexPDE finite element model builder for Partial Differential Equations [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pdesolutions.com>. – Дата доступа: 15.01.2021.
12. Pagni, P.J. Glass Breaking in Fires / P.J. Pagni, A.A. Joshi // *Proceedings of the Third International Symposium «Fire Safety Science»*. – Berkeley, USA. – 1991. – P. 791–802. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.3-791.
13. McLellan, G.W. Glass Engineering Handbook / G.W. McLellan, E.B. Shand. – New York: McGrawHill Book Co., 1984. – 481 p.

**Исследование влияния материала оконного профиля на однослойную стеклянную панель в условиях стандартного огневого воздействия**

**Study of the influence of the window profile material on a single-layer glass panel under standard fire exposure**

**Дмитриченко Александр Степанович**

кандидат технических наук, доцент

Белорусский государственный технологический университет, кафедра энергосбережения, гидравлики и теплотехники, заведующий кафедрой

Адрес: ул. Свердлова, 13а,  
220006, г. Минск, Беларусь

e-mail: das2312@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-8818-5243

**Aleksandr S. Dmitrichenko**

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Belarusian State Technological University,  
Chair of Energy Saving, Hydraulics and Heat Engineering, Head of the Chair

Address: Sverdlova str., 13a,  
220118, Minsk, Belarus

e-mail: das2312@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-8818-5243

**Здитовецкая Светлана Валентиновна**

кандидат технических наук

Белорусский государственный технологический университет, кафедра энергосбережения, гидравлики и теплотехники, доцент

Адрес: ул. Свердлова, 13а,  
220006, г. Минск, Беларусь

e-mail: teka\_11@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4978-6521

**Svetlana V. Zditovetskaya**

PhD in Technical Sciences

Belarusian State Technological University,  
Chair of Energy Saving, Hydraulics and Heat Engineering, Associate Professor

Address: Sverdlova str., 13a,  
220118, Minsk, Belarus

e-mail: teka\_11@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4978-6521

**Мамедова Севиндж Иззат**

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра пожарной безопасности, адъюнкт

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: mamedova\_si@mail.ru

**Sevindzh I. Mamedova**

The State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Fire Safety, adjunct

Address: Mashinostroiteley str., 25,  
220118, Minsk, Belarus

e-mail: mamedova\_si@mail.ru

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.300>

## STUDY OF THE INFLUENCE OF THE WINDOW PROFILE MATERIAL ON A SINGLE-LAYER GLASS PANEL UNDER STANDARD FIRE EXPOSURE

Dmitrichenko A.S., Zditovetskaya S.V., Mamedova S.I.

*Purpose.* To develop a method for calculating the fire resistance of a single-layer flat glass panel enclosed in a frame under the conditions of standard impact during various fire loads, taking into account the design features of the frame and the thermophysical properties of air, fume gases and the frame.

*Methods.* Calculations of the temperature and stress distribution of a bounded glass panel are performed numerically using the FlexPDE software package.

*Findings.* The distribution of temperature and stresses in a single-layer flat glass panel enclosed in a window profile is calculated, taking into account the temperature dependence of the thermophysical characteristics of glass, air and flue gases, the design features of the translucent structure and the nonlinear nature of the change in the ambient temperature during a fire. The effect of the material of the window profile on the destruction of a single-layer flat glass panel enclosed in a frame under conditions of standard fire exposure under various fire loads has been investigated.

*Application field of research.* The results of the study can be used in the design of buildings and structures to ensure safe operation and evacuation in the event of a fire.

*Keywords:* translucent structure, heat transfer coefficient, thermal tension, thermal impact, fire resistance.

(The date of submitting: June 30, 2021)

### REFERENCES

1. Pagni P.J. Thermal Glass Breakage. *Fire Safety Science – Proceedings of the Seventh International Symposium*, 2002. Pp. 3–25. URL: [https://iafss.org/publications/fss/7/3/view/fss\\_7-3.pdf](https://iafss.org/publications/fss/7/3/view/fss_7-3.pdf).
2. Karslou G., Eger D. *Teploprovodnost' tverdykh tel* [Thermal conductivity of solids]. Moscow: Nauka, 1964. 488 p. (rus)
3. Prokhach E.I. Ob ispol'zovanii kvazistatsionarnogo podkhoda v raschetakh konvektivnogo teplo-obmena [On the use of the quasi-stationary approach in the calculations of convective heat transfer]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 1976. Vol. 31, No. 5. Pp. 857–860. (rus)
4. Gusev S.E. Shklover G.G. *Svobodno-konvektivnyy teploobmen pri vneshnem obtekanii tel* [Free-convective heat transfer in the external flow of bodies]. Moscow. Energoatomizdat, 1992. 166 p. (rus)
5. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Handbook of thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow: Nauka, 1972. 720 p. (rus)
6. *Pribory termicheskogo analiza gruppy NETZSCH* [Devices of the thermal analysis of NETZSCH group]. Available at: <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products-solutions/thermal-diffusivity-conductivity/> (accessed January 20, 2021). (rus)
7. Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity. *Journal of Appl. Physics*, 1961. Vol. 32. No. 9. Pp. 1675–1684.
8. Chirkin V.S. *Teploprovodnost' promyshlennykh materialov* [Thermal conductivity of industrial materials]. Moscow: Mashgiz, 1962. 247 p. (rus)
9. Bansal N.P., Doremus R.H. *Handbook of Glass Properties*. New York: Academic Press Inc., 1986. 680 p.
10. Fletcher D.Q. *Mechanics of Materials*. New York: Holt. Reinhart and Winston, 1985. 474 p.
11. *FlexPDE finite element model builder for Partial Differential Equations*, available at <http://www.pdesolutions.com> (accessed: January 15, 2021).
12. Pagni P.J., Joshi A.A., Glass Breaking in Fires. *Proceedings of the Third International Symposium «Fire Safety Sciences»*, Berkeley, USA, 1991. Pp. 791–802. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.3-791.
13. McLellan G.W., Shand E.B. *Glass Engineering Handbook* / New York: McGrawHill Book Co., 1984. 481 p.