

УДК 614.841.332

**РАСЧЕТ ПРЕДЕЛА ОГНЕСТОЙКОСТИ ОДНОСЛОЙНОГО СТЕКЛОПАКЕТА****Дмитриченко А.С., Здитовецкая С.В., Мамедова С.И.**

Проведены расчеты, связанные с распределением температуры и напряжений в однослойном стеклопакете, с учетом температурной зависимости теплофизических характеристик стекла, воздуха и дымовых газов, конструктивных особенностей светопрозрачной конструкции и нелинейного характера изменения температуры окружающей среды при пожаре. Рассчитана зависимость предела огнестойкости по критерию достижения критических напряжений в стеклопакете, приводящих к его разрушению, от толщины панелей.

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

(Поступила в редакцию 26 апреля 2019 г.)

**Введение.** Одним из способов обеспечения безопасности людей при пожаре является их своевременная эвакуация. В связи с этим помещения, этажи и здания в целом должны иметь такое объемно-планировочное и конструктивное исполнение, при котором все находящиеся внутри них люди в случае пожара могли бы своевременно и беспрепятственно эвакуироваться наружу до того момента, как опасные факторы пожара достигнут своих предельно допустимых значений и станут представлять опасность для жизни и здоровья.

Разрушение ограждающих светопрозрачных конструкций (СПК) может оказать существенное влияние на динамику развития пожара. При разрушении СПК и вскрытии проемов происходит резкий приток воздуха в зону горения, что приводит к возникновению объемной вспышки, которая способствует резкому нарастанию опасных факторов пожара. Таким образом, актуальными являются исследования, направленные на развитие теоретических основ расчета предела огнестойкости СПК при пожаре.

В Еврокодах [1–7] приводятся расчетные методы для оценки огнестойкости строительных конструкций из железобетона [2], стали [3], сталежелезобетона [4], дерева [5], камня [6], алюминия [7]. В тоже время Еврокод для оценки огнестойкости СПК до настоящего времени не разработан. В существующих нормативных документах по методам определения огнестойкости и пожарной опасности СПК [8–9] приводятся экспериментальные методы огневых испытаний. Методика, приведенная в [9], позволяет определять огнестойкость образцов стекла не менее 1200×1000 мм, не входящего в состав строительной конструкции. При этом согласно [9] устанавливается предел огнестойкости по всем предельным состояниям для данного вида СПК:

1. *Предельное состояние по критерию R (несущая способность).* Считают, что образец стекла достиг предельного состояния по критерию *R*, если наступил хотя бы один из следующих признаков:

- 1) разрушение или выпадение стекла из испытательной рамы;
- 2) достижение предельной величины прогиба по ГОСТ 30247.1;
- 3) достижение предельной скорости увеличения прогиба по ГОСТ 30247.1.

2. *Предельное состояние по критерию E (целостность).* Считают, что образец стекла достиг предельного состояния по критерию *E*, если наступил хотя бы один из следующих признаков:

- 1) выпадение стекла из испытательной рамы;
- 2) появление на неподвергаемой огневому воздействию стороне стекла устойчивого пламени в течение 10 с и более;

3. *Предельное состояние по критерию I (изоляция).* Считают, что образец стекла достиг предельного состояния по критерию *I*, если наступил хотя бы один из следующих признаков:

- 1) повышение средней температуры неподвергаемой огневому воздействию поверхности стекла более чем на 140 °С по сравнению с ее начальной средней температурой;
- 2) повышение температуры в любой точке неподвергаемой огневому воздействию поверхности стекла более чем на 180 °С по сравнению с ее начальной средней температурой.

Огнестойкость светопрозрачной конструкции заключается в ее способности сохранять несущие и ограждающие функции в условиях пожара. В общем случае эта оценка заключается в определении промежутка времени от начала огневого воздействия по стандартному температурному режиму до наступления одного из нормируемых для рассматриваемой конструкции предельных состояний по огнестойкости, перечисленных выше.

**Основная часть.** Рассмотрим светопрозрачную конструкцию, которая состоит из двух стеклянных панелей, разделенных воздушным зазором (рис. 1). Каждая стеклянная панель имеет высоту  $2H$  и заключена в раму шириной  $d$ . Начало координат разместим в центре панели на краю рамы и направим ось  $z$  вдоль кромки рамы, ось  $y$  – перпендикулярно кромке рамы по направлению к центру панели, ось  $x$  – перпендикулярно поверхности стеклянной панели толщиной  $L$ .

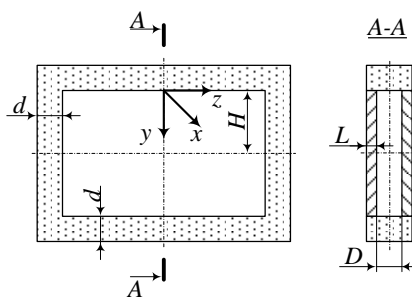


Рисунок 1. – Однослойный стеклопакет

Температура в каждой из панелей будет определяться из решения двумерного дифференциального уравнения теплопроводности [10]. Будем считать, что до момента разрушения первой панели, обращенной в сторону пожара, она поглощает весь радиационный поток и на вторую панель он не воздействует [11].

$$\rho(T_1)c(T_1)\frac{\partial T_1(x, y, t)}{\partial t} = \lambda(T_1)\left(\frac{\partial^2 T_1(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1(x, y, t)}{\partial y^2}\right) + I(t)\frac{e^{-x/\gamma}}{\gamma}\eta(y)\eta(t - \tau_{b2}) \quad \text{при } 0 < x < L, \quad -d < y < H, \quad 0 < t < \tau_{b1}; \quad (1)$$

$$\rho(T_2)c(T_2)\frac{\partial T_2(x, y, t)}{\partial t} = \lambda(T_2)\left(\frac{\partial^2 T_2(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2(x, y, t)}{\partial y^2}\right) + I(t)\frac{e^{-x/\gamma}}{\gamma}\eta(y) \quad \text{при } 0 < x < L, \quad -d < y < H, \quad 0 < t < \tau_{b2}, \quad (2)$$

где  $\rho(T)$  – плотность стекла, кг/м<sup>3</sup>;  $c(T)$  – теплоемкость стекла, Дж/(кг · К);  $T_1(x, y, t)$  – температура первой панели, К;  $T_2(x, y, t)$  – температура второй панели, К;  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К);  $x, y$  – пространственные координаты, м;  $t$  – время, с;  $I(t)$  – плотность лучистого потока, поступающего на поверхность пластины, Вт/м<sup>2</sup>;  $\gamma$  – длина затухания (величина, обратная коэффициенту поглощения), м;  $\eta(y)$  – единичная функция Хевисайда ( $\eta(y) = 0$  при  $y < 0$ ;  $\eta(y) = 1$  при  $y > 0$ );  $\tau_{b2}$  – время разрушения наружной панели, с;  $\tau_{b1}$  – время разрушения внутренней панели, с ( $\tau_{b1} > \tau_{b2}$ ). Индексы: 1 – первая панель; 2 – вторая панель.

Начальное условие имеет вид

$$T_1(x, y, 0) = T_i; \quad T_2(x, y, 0) = T_i \quad \text{при } t = 0, \quad (3)$$

где  $T_i$  – начальная температура пластины, К.

Граничные условия имеют вид

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

$$-\lambda \frac{\partial T_1(L, y, t)}{\partial x} = \left[ h_{12} (T_2(0, y, t) - T_1(L, y, t)) + \varepsilon_{i2} \sigma (T_2^4(0, y, t) - T_1^4(L, y, t)) \right] \eta(y) \eta(\tau_{b2} - t) + \\ + \left[ h_2 (T_{c2}(t) - T_1(L, y, t)) + \varepsilon_{i\delta} \sigma (T_{i2}^4(t) - T_1^4(L, y, t)) \right] \eta(y) \eta(t - \tau_{b2}); \quad (5)$$

$$-\lambda \frac{\partial T_2(0, y, t)}{\partial x} = \left[ h_{12} (T_2(0, y, t) - T_1(L, y, t)) + \varepsilon_{i2} \sigma (T_2^4(0, y, t) - T_1^4(L, y, t)) \right] \eta(y); \quad (6)$$

$$-\lambda \frac{\partial T_2(L, y, t)}{\partial x} = \left[ h_2 (T_{c2}(t) - T_2(L, y, t)) + \varepsilon_{i\delta} \sigma (T_{c2}^4(t) - T_2^4(L, y, t)) \right] \eta(y); \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_1(x, -d, t)}{\partial y} = \frac{\partial T_1(x, H, t)}{\partial y} = \frac{\partial T_2(x, -d, t)}{\partial y} = \frac{\partial T_2(x, H, t)}{\partial y} = 0, \quad (8)$$

где  $h_1(T)$ ,  $h_2(T)$  – коэффициенты конвективной теплоотдачи с поверхностями в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $T_{c1}(t)$ ,  $T_{c2}(t)$  – температура окружающей среды, К;  $h_{12}(T)$  – коэффициент конвективной теплоотдачи в зазоре между панелями, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $T_i(x)$  – начальная температура пластин, К;  $\varepsilon_{пр}$  – приведенная степень черноты;  $\varepsilon_{i2}$  – приведенная степень черноты системы «панель – панель»;  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>));  $L$  – толщина панели, м.

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

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{1/\varepsilon_{cp} + 1/\varepsilon_{п} - 1}, \quad (9)$$

где  $\varepsilon_{cp}$ ,  $\varepsilon_{п}$  – степень черноты среды и поверхности стекла соответственно.

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

$$\varepsilon_{i2} = \frac{\varepsilon_{п}}{2 - \varepsilon_{п}}. \quad (10)$$

Коэффициенты конвективного теплообмена  $h_1$  и  $h_2$  определяем по зависимостям [10]. Коэффициент теплоотдачи в зазоре между вертикальными панелями  $h_{12}$  – из выражения [12]:

$$h_{12} = \frac{Nu_{12cp,v} \lambda_v}{H}, \quad (11)$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К);  $H$  – высота стеклянной панели, м. Индекс  $v$  – воздух.

Критерий Нуссельта рассчитывается по формуле

$$Nu_{12cp,v} = \left[ 1 + \left( 0,0303 Ra_{12,v}^{0,402} \right)^{11} \right]^{1/11}, \quad (12)$$

где  $Ra$  – критерий Рэлея.

Критерий Рэлея для воздуха рассчитывается по формуле

$$Ra_{12,v} = Gr_{12,v} Pr_v, \quad (13)$$

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

При этом критерий Грасгофа вычисляется по формуле

$$Gr_{12,в} = \frac{g \beta_t (T_{п1} - T_{п2}) D^3}{\nu_B^2}, \quad (14)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $\beta_t = 1/T$  – термический коэффициент объемного расширения, К<sup>-1</sup>;  $T_{п}$  – температура поверхности стеклянной панели, °С;  $D$  – ширина зазора между панелями, м;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с. Индексы: 1 – первая панель; 2 – вторая панель.

Критерий Прандтля для воздуха находится из соотношения

$$Pr_B = \frac{\nu_B}{a_B}, \quad (15)$$

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

Теплофизические и динамические параметры берутся при температуре

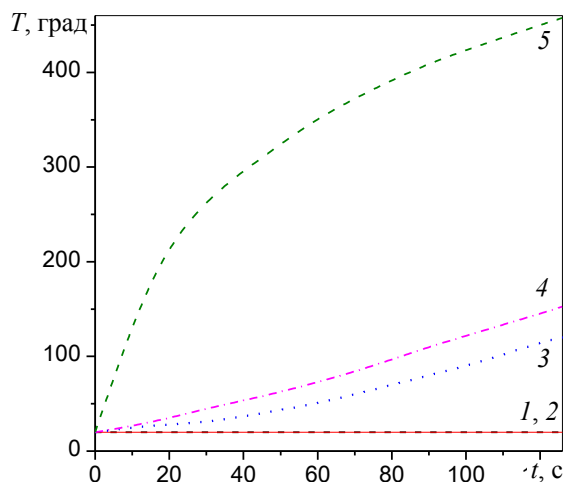
$$T_{cp12} = \frac{T_{пв1} - T_{пв2}}{2}, \quad (16)$$

где  $T_{пв}$  – температура внутренней поверхности, К.

Для расчета распределения температуры в системе двух стеклянных панелей с учетом температурной зависимости теплофизических характеристик стекла, воздуха и дымовых газов, нелинейного характера изменения температуры окружающей среды по стандартной кривой пожара и коэффициентами теплоотдачи с поверхностями пластины (11) – (16) в среде пакета Flexpde [13] был разработан программный код решения краевой задачи (1) – (10) методом конечных элементов. Физические свойства стекла и диапазон их изменения приведены в [14, 15].

С помощью разработанного программного кода рассчитаны профили температуры по толщине двух стеклянных панелей и зависимости от времени изменения температуры панелей. На рисунке 2 приведены зависимости от времени температуры поверхностей системы СПК из двух вертикальных панелей высотой 1,5 м и толщиной 5 мм. Расстояние между панелями – 20 мм, длина поглощения  $l = 2$  мм, интенсивность падающего излучения  $I = 5$  кВт/м<sup>2</sup>.

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 и вторая панель. В зависимости от механических свойств стекла (критических напряжений, при которых происходит разрушение) панель, обращенная к пожару, разрушается через некоторое время. Из зависимостей, приведенных на рисунке 2, видно, что для стекла с модулем упругости  $E = 7 \cdot 10^{10}$  Па и коэффициентом линейного расширения  $\beta = 8,5 \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup> (критические напряжения  $\sigma_b = 66$  МПа) первая панель, обращенная к пожару, разрушается через 126 с после начала пожара. Заметим, что при таких же условиях разрушение одиночной панели произошло бы через 132 секунды после начала пожара. Это объясняется тем, что коэффициент теплоотдачи с необогреваемой стороны одиночной панели выше, чем коэффициент теплоотдачи в воздушный зазор между панелями. Поэтому время достижения перегрева центральной зоны, приводящего к возникновению критических напряжений, относительно холодного края первой панели однослойного пакета меньше, чем аналогичное время перегрева одиночной панели. Будем считать, что после разрушения первой панели сразу происходит ее выпадение из рамы и на вторую панель начинают воздействовать тепловое излучение и газовая среда, нагретая пожаром.

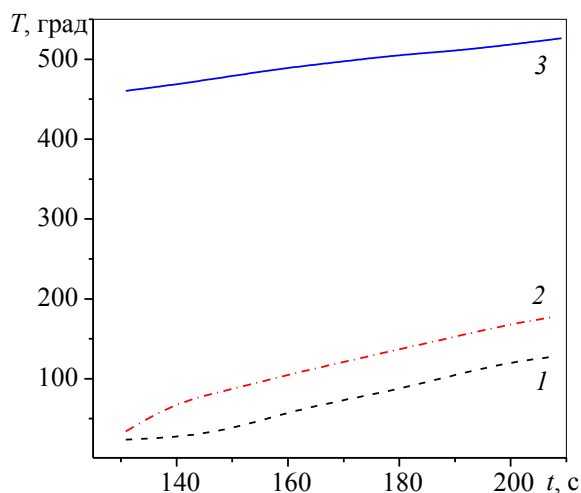


1, 2 – поверхности второй панели; 3 – необогреваемая сторона первой панели; 4 – обогреваемая сторона первой панели; 5 – стандартная кривая пожара

**Рисунок 2.** – Зависимость температуры поверхностей панелей от времени от начала возникновения пожара, до разрушения первой панели, обращенной к огневому воздействию

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. Согласно рисунку 2 в момент разрушения первой панели вторая панель прогревается всего на несколько градусов. Сторона, обращенная в сторону воздушного зазора и первой панели, – на 4,5 °С, а сторона, обращенная в сторону окружающей среды, – на 2,5 °С. Температура окружающей среды со стороны пожара достигает при этом 462 °С.

При таких начальных условиях рост температуры поверхностей второй панели происходит по зависимостям, приведенным на рисунке 3. Расчет показывает, что вторая панель разрушается через 79 с после разрушения первой панели. Таким образом, в данном случае светопрозрачная конструкция, состоящая из двух панелей, разрушается на 73 с позднее, чем однопанельная светопрозрачная конструкция.

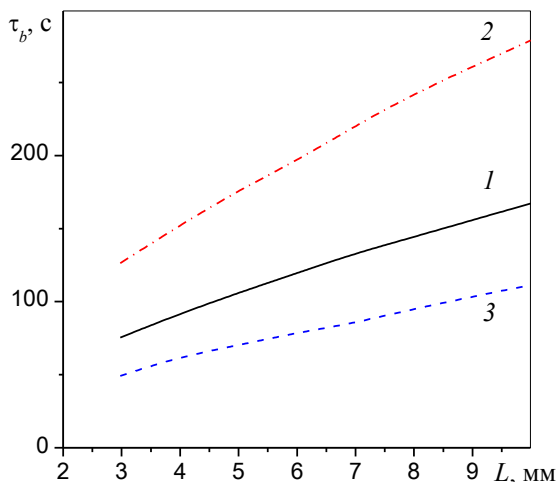


1 – необогреваемая сторона второй панели; 2 – обогреваемая сторона второй панели; 3 – стандартная кривая пожара

**Рисунок 3.** – Зависимость температуры поверхности второй панели от времени от момента разрушения первой панели до момента разрушения второй панели

На рисунке 4 показана зависимость предела огнестойкости по критерию достижения критических напряжений в однослойном стеклопакете, приводящих к его разрушению, от

толщины панелей. При этом половина ширины панели  $H = 0,75$  м, расстояние между панелями – 2 см, интенсивность падающего излучения –  $5 \text{ кВт/м}^2$ , длина поглощения – 1 мм, критическая температура –  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ .



1 – время наступления разрушения однослойной панели; 2 – время наступления разрушения однослойного стеклопакета; 3 – разность времени разрушения однослойной панели и однослойного стеклопакета

**Рисунок 4. – Зависимость предела огнестойкости по критерию достижения критических напряжений в однослойной панели и однослойном стеклопакете, приводящих к их разрушению, от толщины панелей**

Из приведенных на рисунке 4 зависимостей видно, что, время наступления разрушения возрастает с увеличением толщины панели. Причем вторая панель разрушается быстрее первой за счет того, что на нее воздействуют более горячие дымовые газы, так что общее время разрушение однослойного стеклопакета превосходит время разрушения однослойной панели не в два раза, а примерно в 1,66 раза.

**Заключение.** На основе разработанного программного кода с использованием пакета Flexpde рассчитаны профили температуры по толщине двух стеклянных панелей и зависимости от времени изменения температуры панелей.

Показано, что в однослойном стеклопакете панель, обращенная к пожару, разрушается быстрее, чем одиночная панель при таких же условиях. При этом вторая панель разрушается быстрее первой за счет того, что на нее воздействуют более горячие дымовые газы.

Рассчитана зависимость предела огнестойкости по критерию достижения критических напряжений в однослойном стеклопакете, приводящих к его разрушению, от толщины панелей. Показано, что время наступления разрушения возрастает с увеличением толщины панели.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Actions on structures: Eurocode 1. Part 1–2: General actions – Actions on structures exposed to fire: EN 1991-1-2:2002. – Brussels: European committee for standardization, 2002. – 61 p.
2. Design of concrete structures: Eurocode 2. Part 1–2: General rules – Structural fire design: EN 1992-1-2:2004. – Brussels: European committee for standardization, 2004. – 99 p.
3. Design of steel structures: Eurocode 3. Part 1–2: General rules – Structural fire design: EN 1993-1-2:2005. – Brussels: European committee for standardization, 2005. – 78 p.
4. Design of composite steel and concrete structures: Eurocode 4. Part 1–2: General rules – Structural fire design: EN 1994-1-2:2005. – Brussels: European committee for standardization, 2005. – 109 p.
5. Design of timber structures: Eurocode 5. Part 1–2: General rules – Structural fire design: EN 1995-1-2:2004. – Brussels: European committee for standardization, 2004. – 69 p.

6. Design of masonry structures: Eurocode 6. Part 1–2: General rules – Structural fire design: EN 1996-1-2:2005. – Brussels: European committee for standardization, 2005. – 83 p.
7. Design of aluminium structures: Eurocode 9. Part 1–2: General rules – Structural fire design: EN 1999-1-2:2007. – Brussels: European committee for standardization, 2007. – 61 p.
8. Fire resistance tests. Part 1: General requirements: EN 1363-1:1999. – М.: BSI, 1999. – 52 p.
9. Стекло и изделия из него. Метод испытания на огнестойкость: Межгосударственный стандарт: ГОСТ 33000-2014. – Введ. 01.04.2016. – М.: Стандартиформ, 2015. – 13 с.
10. Дмитриченко, А.С. Исследование термонапряженного состояния светопрозрачной конструкции при огневом воздействии / А.С. Дмитриченко [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 3. Физ.-матем. науки – 2018. – № 2. – С. 76–81.
11. Cuzzillo, V. R. Thermal Breakage of Double-pane Glazing by Fire / V.R. Cuzzillo, P.J. Pagni // Journal of Fire Prot. Engr. – 1998. – Vol. 9, № 1. – P. 1–11.
12. Мартыненко, О.Г. Свободно-конвективный теплообмен. Справочник. / О.Г. Мартыненко, Ю.А. Соковишин. – Минск: Наука и техника, 1982. – 399 с.
13. FlexPDE finite element model builder for Partial Differential Equations [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pdesolutions.com>. – Дата доступа: 15.09.2018.
14. Bansal, N.P. Handbook of Glass Properties / N.P. Bansal, R.H. Doremus. – NY.: Academic Press Inc., 1986. – 680 p.
15. McLellan, G.W. Glass Engineering Handbook / G.W. McLellan, E.B. Shand. – NY.: McGrawHill Book Co., 1984. – 484 p.

**Расчет предела огнестойкости однослойного стеклопакета**  
**Calculation of the limit of fire resistance of single-layer glass unit**

---

***Дмитриченко Александр Степанович***

кандидат технических наук, доцент

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

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

e-mail: [egit@belstu.by](mailto:egit@belstu.by)

***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: 220118, Belarus, Minsk,  
ul. Sverdlova, 13a

e-mail: [egit@belstu.by](mailto:egit@belstu.by)

---

***Здитовецкая Светлана Валентиновна***

кандидат технических наук

Белорусский государственный  
технологический университет, кафедра  
энергосбережения, гидравлики  
и теплотехники, старший преподаватель

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

e-mail: [teka\\_11@mail.ru](mailto:teka_11@mail.ru)

***Svetlana V. Zditovetskaya***

PhD in Technical Sciences

Belarusian State Technological University,  
Chair of Energy Saving, Hydraulics and Heat  
Engineering, Senior Lecturer

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

e-mail: [teka\\_11@mail.ru](mailto:teka_11@mail.ru)

---

***Мамедова Севиндж Иззат***

Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты МЧС  
Беларуси», адъюнкт

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

***Sevindzh I. Mamedova***

The State Educational Establishment «University  
of Civil Protection of the Ministry for Emergency  
Situations of the Republic of Belarus», Adjunct

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



## CALCULATION OF THE LIMIT OF FIRE RESISTANCE OF SINGLE-LAYER GLASS UNIT

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

*Purpose.* The article provides a method for calculating the fire resistance of translucent structures. As a translucent structure, we consider a single-layer double-glazed glass unit consisting of a frame and two glasses separated by an air space. The fire resistance limit is determined by the limit state – the criterion of integrity.

*Methods.* Calculations of temperature and stress distribution in a limited glass panel are performed numerically using the Flexpde software package.

*Finding.* When calculating the fire resistance limit, the temperature dependence of thermal characteristics of glass, air and flue gases, design features of translucent structures and nonlinear nature of changes in ambient temperature during fire exposure are taken into account. As a result of the calculations, it was shown that the time of destruction onset increases with increasing of panel thickness. Moreover, the second panel is destroyed faster than the first one because it is exposed to hotter flue gases, so that the total time of destruction of a single-layer double-glazed glass unit does not exceed the time of destruction of a single glass twice, but only by 1.66 times.

*Application field of research.* The obtained results can be used in the development of the draft additions and changes in the TCP 45-2.02-110-2008.

*Conclusion.* The developed method makes it possible to calculate the fire resistance limit by the criterion of achieving critical stresses in a single-layer glass unit leading to its destruction.

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

(The date of submitting: April 26, 2019)

### REFERENCES

1. *European Standard EN 1991-1-2:2002. Eurocode 1: Actions on structures. Part 1–2: General actions – Actions on structures exposed to fire.* Brussels: European committee for standardization, 2002. 61 p.
2. *European Standard EN 1992-1-2:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design.* Brussels: European committee for standardization, 2004. 99 p.
3. *European Standard EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design.* Brussels: European committee for standardization, 2005. 78 p.
4. *European Standard EN 1994-1-2:2005. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design.* Brussels: European committee for standardization, 2005. 109 p.
5. *European Standard EN 1995-1-2:2004. Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design.* Brussels: European committee for standardization, 2004. 69 p.
6. *European Standard EN 1996-1-2:2005. Eurocode 6: Design of masonry structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design.* Brussels: European committee for standardization, 2005. 83 p.
7. *European Standard EN 1999-1-2:2007. Eurocode 9: Design of aluminium structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design.* Brussels: European committee for standardization, 2007. 61 p.
8. *European Standard EN 1363-1:1999. Fire resistance tests. Part 1: General requirements.* Moscow: BSI, 1999. 52 p.
9. *Mezhhgosudarstvennyy standart. Steklo i izdeliya iz nego. Metod ispytaniya na ognestoykost' GOST 33000-2014* [Glass and glassware. A test method on fire resistance: Interstate Standard GOST 33000-2014]. Affirmed April 1, 2016. Moscow: Standartinform, 2015. 13 p. (rus)
10. Dmitrichenko A.S., Zditovetskaya S.V., Yanovskiy S.Yu., Kerimov K.D. Issledovanie termonapryazhennogo sostoyaniya svetoprozrachnoy konstruktsii pri ognevom vozdeystvii [Study of the thermal stress state of glazing assembly induced by fire]. *Trudy BGTU. Ser.3. Fhys.and Maths. Siences*, 2018. No. 2. Pp. 76–81. (rus)
11. Cuzzillo B.R., Pagni P.J. Thermal Breakage of Double-pane Glazing by Fire. *Journal of Fire Prot. Engr.*, 1998. Vol. 9, No. 1. Pp. 1–11.
12. Martynenko O.G., Sokovishin Yu.A. *Svobodno-konvektivnyy teploobmen. Spravochnik* [Free convective heat transfer. Reference book]. Minsk: Nauka i tehnika, 1982. 399 p. (rus)

13. *FlexPDE finite element model builder for Partial Differential Equations. Safety*, available at <http://www.pdesolutions.com> (accessed: September 15, 2018).
14. Bansal N.P., Doremus R.H. *Handbook of Glass Properties*. New York: Academic Press Inc., 1986. 680 p.
15. McLellan G. W., Shand E. B. *Glass Engineering Handbook*. New York: McGrawHill Book Co., 1984. 484 p.