

УДК 614.841.332

А. С. Дмитриченко<sup>1</sup>, С. В. Здитовецкая<sup>1</sup>, С. Ю. Яновский<sup>2</sup>, К. Д. Керимов<sup>2</sup><sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет<sup>2</sup>Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ  
СВЕТОПРОЗРАЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ОГНЕВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Рассматриваются вопросы, связанные с анализом термонапряженного состояния ограниченной стеклянной панели с учетом температурной зависимости теплофизических свойств стекла, воздуха и дымовых газов, конструктивных особенностей светопрозрачной конструкции и нелинейного характера изменения температуры окружающей среды при огневом воздействии.

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

A. S. Dmitrichenko<sup>1</sup>, S. V. Zditovetskaya<sup>1</sup>, S. Yu. Yanovskiy<sup>2</sup>, K. D. Kerimov<sup>2</sup><sup>1</sup>Belarusian State Technological University<sup>2</sup>University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus**STUDY OF THE THERMAL STRESS STATE  
OF GLAZING ASSEMBLY INDUCED BY FIRE**

The paper examines the issues related to the analysis of thermal stresses in the limited glass panel taking into account the temperature dependence of thermophysical properties of glass, air and combustion gases, design features of a translucent structure and the nonlinear nature of the ambient temperature change when exposed to fire.

**Key words:** translucent structure, thermal influence, thermal tension.

**Введение.** В настоящее время одной из главных тенденций современной архитектуры является широкое использование светопрозрачных конструкций (СПК) из стекла, которые делают современные здания более интересными и привлекательными. Основным препятствием для распространения данных технологий в строительстве является отсутствие в нормативных документах методик, позволяющих рассчитывать термические напряжения, возникающие за счет неравномерности нагрева при пожаре [1]. Актуальной задачей является разработка научно-обоснованного метода расчета термических напряжений в современных СПК.

При огневом воздействии на оконную панель ее открытая часть нагревается, а температура закрытой рамой части остается почти неизменной. Часть панели, которая закрыта рамой, испытывает напряжение за счет неравномерности прогрева по площади листа, что приводит к образованию в ней трещин и разрушению. Для определения термонапряженного состояния стеклянной панели необходимо решить задачу о распределении температуры и напряжений в ограниченной стеклянной пластине в условиях огневого воздействия на ее поверхность.

**Основная часть.** Рассмотрим задачу о распределении температуры в стеклянной панели,

заключенной 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 (высота панели равна  $2H$ ), ось  $x$  направлена перпендикулярно поверхности стеклянной панели толщиной  $L$ .

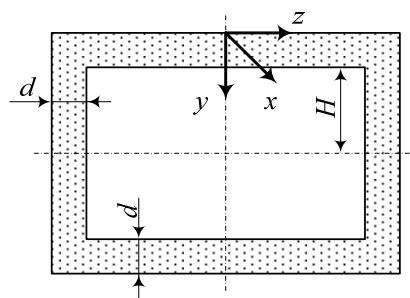


Рис. 1. Стеклянная панель, заключенная в раму

Для определения поля температуры в стеклянной пластине необходимо решить дифференциальное уравнение теплопроводности [2]:

$$\rho c \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial y^2} \right) + I(t) k e^{-kx} \eta(y); \quad 0 < x < L; \quad -d < y < H, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность,  $\text{кг/м}^3$ ;  $c$  – теплоемкость  $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $T(x, y, t)$  – температура,  $\text{К}$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $x, y$  – пространственные координаты,  $\text{м}$ ;  $t$  – время,  $\text{с}$ ;  $I(t)$  – плотность лучистого потока, поступающего на поверхность пластины,  $(\text{Вт/м}^2)$ ;  $k$  – коэффициент поглощения,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\eta(y)$  – единичная функция Хевисайда ( $\eta(y) = 0$  при  $y < 0$ ;  $\eta(y) = 1$  при  $y > 0$ ).

Начальное условие имеет вид

$$T(x, y, 0) = T_i \text{ при } t = 0, \quad (2)$$

где  $T_i$  – начальная температура пластины,  $\text{К}$ .

Краевые условия записаны в виде

$$-\lambda \frac{\partial T(0, y, t)}{\partial x} = [h_1(T_{c1}(t) - T(0, y, t)) + \varepsilon_{\text{пр}}\sigma(T_{c1}^4(t) - T^4(0, y, t))]\eta(y) \text{ при } x = 0; \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(L, y, t)}{\partial x} = [h_2(T(L, y, t) - T_{c2}(t)) + \varepsilon_{\text{пр}}\sigma(T^4(L, y, t) - T_{c1}^4(t))]\eta(y) \text{ при } x = L; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T(x, -d, t)}{\partial y} = \frac{\partial T(x, H, t)}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

где  $h_1, h_2$  – коэффициенты конвективной теплоотдачи с поверхностями,  $\text{Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ ;  $T_{c1}(t), T_{c2}(t)$  – температура окружающей среды,  $\text{К}$ ;  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты;  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К}^4)$ );  $L$  – толщина пластины,  $\text{м}$ .

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

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

Коэффициент конвективного теплообмена от среды, нагреваемой пожаром  $h_2(T(L, t), T_{c2}(t))$ , меняется с изменением температуры дымовых газов и температуры обогреваемой поверхности пластины, коэффициент конвективного теплообмена между необогреваемой поверхностью пластины и окружающим воздухом  $h_1(T(0, t), T_{c1})$  меняется с ростом температуры необогреваемой поверхности.

Средний коэффициент теплоотдачи для вертикальной поверхности высотой  $H$  с учетом ламинарного и турбулентного режимов в широком диапазоне изменения параметров ( $\text{Pr} = 0,022\text{--}7640, \text{Ra}_H = 10^{-4}\text{--}10^{15}$ ) можно определить из выражений [3]:

$$h_1 = \frac{\text{Nu}_{\text{ср,в}} \lambda_{\text{в}}}{H}; h_2 = \frac{\text{Nu}_{\text{ср,г}} \lambda_{\text{г}}}{H}, \quad (7)$$

где  $\text{Nu}_{\text{ср}}$  – критерий Нуссельта;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $H$  – высота стеклянной панели,  $\text{м}$ . Индексы: в – воздух; г – дымовые газы.

$$\text{Nu}_{\text{ср,в}}^{1/2} = 0,825 + \frac{0,387\text{Ra}_{H,\text{в}}^{1/6}}{\left[1 + (0,492/\text{Pr}_{\text{в}})^{9/16}\right]^{8/27}}; \quad (8)$$

$$\text{Nu}_{\text{ср,г}}^{1/2} = 0,825 + \frac{0,387\text{Ra}_{H,\text{г}}^{1/6}}{\left[1 + (0,492/\text{Pr}_{\text{г}})^{9/16}\right]^{8/27}},$$

где  $\text{Ra}$  – критерий Релея;  $\text{Pr}$  – критерий Прандтля.

$$\text{Gr}_{H,\text{в}} = \frac{g \beta_t (T_{\infty} - T_{\text{п}}) H^3}{\nu_{\text{в}}^2}; \quad (9)$$

$$\text{Gr}_{H,\text{г}} = \frac{g \beta_t (T_{\infty} - T_{\text{п}}) H^3}{\nu_{\text{г}}^2},$$

где  $\text{Gr}$  – критерий Грасгофа;  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\text{м/с}^2$ ;  $\beta_t = 1/T$  – термический коэффициент объемного расширения,  $\text{К}^{-1}$ ;  $T_{\infty}$  – температура окружающей среды,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{п}}$  – температура поверхности стеклянной панели,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

$$\text{Pr}_{\text{в}} = \frac{\nu_{\text{в}}}{a_{\text{в}}}; \text{Pr}_{\text{г}} = \frac{\nu_{\text{г}}}{a_{\text{г}}}, \quad (10)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

$$\text{Ra}_{H,\text{в}} = \text{Gr}_{H,\text{в}} \text{Pr}_{\text{в}}; \text{Ra}_{H,\text{г}} = \text{Gr}_{H,\text{г}} \text{Pr}_{\text{г}}. \quad (11)$$

Теплофизические и динамические параметры, входящие в формулы (4)–(10), берутся при температуре  $T_{\text{ср}}$ :

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_{\infty} - T_{\text{п}}}{2}. \quad (12)$$

Свойства воздуха и дымовых газов при разных температурах, приведенные в таблицах [3], аппроксимированы полиномами второй степени:

$$\lambda_{\text{в}}(T) = 0,02428 + 8,120878 \cdot 10^{-3} \cdot T - 2,971432 \cdot 10^{-8} \cdot T^2; \quad (13)$$

$$\nu_{\text{в}}(T) = 1,319498 \cdot 10^{-5} + 9,118545 \cdot 10^{-8} \cdot T + 8,279991 \cdot 10^{-11} \cdot T^2; \quad (14)$$

$$\text{Pr}_{\text{в}}(T) = 0,707193 - 2,040537 \cdot 10^{-4} \cdot T + 3,26627 \cdot 10^{-7} \cdot T^2; \quad (15)$$

$$\lambda_r(T) = 0,022854 + 8,499151 \cdot 10^{-5} \cdot T - 9,64936 \cdot 10^{-10} \cdot T^2; \quad (16)$$

$$v_r(T) = 1,10659 \cdot 10^{-5} + 9,905 \cdot 10^{-8} \cdot T + 6,376374 \cdot 10^{-11} \cdot T^2; \quad (17)$$

$$Pr_r(T) = 0,71022 - 1,88012 \cdot 10^{-4} \cdot T + 5,594406 \cdot 10^{-8} \cdot T^2. \quad (18)$$

Теплофизические свойства образцов оконного стекла исследовались в интервале температур 25–500°C на приборе LFA 457 MicroFlash фирмы NETZSCH [4] методом лазерной вспышки [5].

Зависимость коэффициента теплопроводности и коэффициента температуропроводности оконного стекла от температуры может быть аппроксимирована полиномами второй степени:

$$\lambda = 0,718899 + 1,541745 \cdot 10^{-3} \cdot T - 1,39502 \cdot 10^{-6} \cdot T^2; \quad (19)$$

$$a = 4,378452 \cdot 10^{-7} + 4,179546 \cdot 10^{-10} \cdot T + 5,629294 \cdot 10^{-10} \cdot T^2. \quad (20)$$

Среднеобъемную температуру помещения при огневом воздействии  $T_{c2}(t)$  зададим при помощи стандартной кривой пожара [6]:

$$T_n(t) = 345 \lg(0,1383t + 1) + T_0, \quad (21)$$

где  $T_n(t)$  – температура огневого воздействия, °C;  $t$  – время воздействия, с;  $T_0$  – начальная температура огневого воздействия, °C.

Распределение напряжений  $\sigma_{zz}$ , Н/м<sup>2</sup> в стекле в области  $-d < y < H$  можно определить из выражения [2]:

$$\sigma_{zz}(y, t) = \frac{E\beta}{L(H+d)} \int_{-d}^H \int_0^L T(x, y, t) dx dy - \frac{E\beta}{L} \int_0^L T(x, y, t) dx, \quad (22)$$

где  $E$  – модуль Юнга, Н/м<sup>2</sup>;  $\beta$  – коэффициент линейного теплового расширения стекла, К<sup>-1</sup>.

Для расчета распределения температуры в стеклянной панели с учетом температурной зависимости теплофизических характеристик стекла, воздуха, дымовых газов и нелинейного характера изменения температуры окружающей среды в процессе пожара задачи (4)–(21) были решены методом конечных элементов с использованием пакета FlexPDE [7].

На рис. 2 показаны профили температуры на обогреваемой стороне панели при разных интенсивностях падающего на нее теплового излучения. При этом принимались коэффициент поглощения  $k = 50 \text{ см}^{-1}$ , половина ширины панели 0,9 м, толщина панели 6 мм, ширина затенения 18 мм.

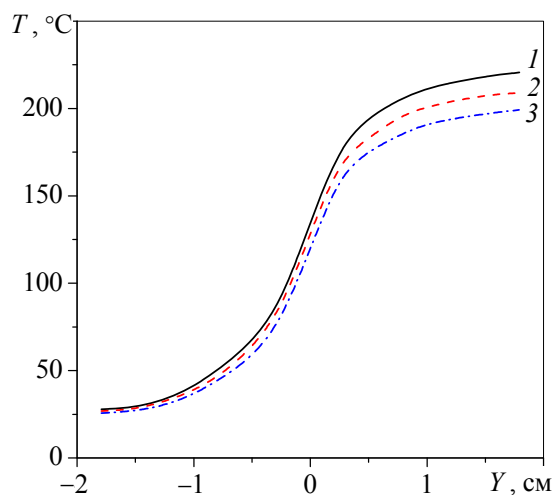


Рис. 2. Распределение температуры по обогреваемой поверхности стеклянной панели в момент времени  $t = 180$  с:  $1 - I = 15 \text{ кВт/м}^2$ ;  $2 - I = 10 \text{ кВт/м}^2$ ;  $3 - I = 5 \text{ кВт/м}^2$

На приведенных зависимостях показано, что температура в области, затененной рамой, остается близкой к начальному значению, а затем быстро возрастает по направлению к центру панели. Чем выше интенсивность теплового излучения, тем выше температура панели.

По определенному температурному профилю по формуле (22) были рассчитаны термические напряжения, возникающие за счет неравномерности прогрева поверхности панели.

На рис. 3 показано распределение напряжений в области панели, затененной рамой, и в открытой области. Видно, что наибольшие растягивающие напряжения возникают в области панели, затененной рамой. При этом напряжения тем больше, чем больше интенсивность падающего теплового излучения. По направлению к центру панели напряжения снижаются и достигают небольших сжимающих значений.

Время достижения критических напряжений  $\tau_b$  в панели, приводящих к ее разрушению, определяется из формулы (23):

$$\sigma_{zz}(-d, \tau_b) = \sigma_b, \quad (23)$$

где  $\sigma_b$  – критические напряжения, приводящие к разрушению стекла.

Выражение (23) можно переписать в виде

$$\Delta T(-d, \tau_b) = \frac{\sigma_{zz}(-d, \tau_b)}{E\beta} = \frac{\sigma_b}{E\beta} = T_k, \quad (24)$$

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

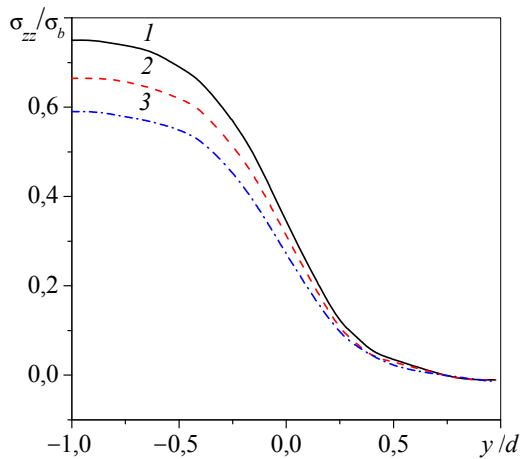


Рис. 3. Распределение напряжений в области, затененной рамой, и открытой области в момент времени  $t = 100$  с: 1 –  $I = 15$  кВт/м<sup>2</sup>; 2 –  $I = 10$  кВт/м<sup>2</sup>; 3 –  $I = 5$  кВт/м<sup>2</sup>

По формулам (23) и (24) были проведены расчеты времени достижения критических напряжений  $\tau_b$  в панели, приводящих к ее разрушению, при различной вариации параметров модели.

На рис. 4 показана зависимость времени достижения критических напряжений  $\tau_b$  в панели от интенсивности радиационного теплового потока  $I$ , поступающего на поверхность панели при разных длинах поглощения излучения  $l = 1/k$ . Половина ширины панели равна  $H = 0,9$  м, толщина панели 6 мм, ширина затенения 18 мм.

Как видно из приведенных зависимостей, время разрушения панели уменьшается с увеличением интенсивности радиационного теплового потока и увеличивается с увеличением критических напряжений в панели.

Зависимость времени достижения критических напряжений  $\tau_b$  в панели от ширины затенения панели рамой  $d$ , мм, при разных длинах поглощения излучения показана на рис. 5. Видно, что время разрушения панели уменьшается с увеличением ширины затенения и тем больше, чем больше длина поглощения и чем больше критическая температура (критическое напряжение).

Увеличение времени  $\tau_b$  с уменьшением ширины затенения объясняется тем, что рас-

тягивающие напряжения, возникающие в затененной области, пропорциональны разности температур центральной зоны панели, подверженной излучению, и ее затененной части. Если ширину затененной части панели уменьшить, то за счет теплопроводности температура этой зоны повысится и уменьшится разность температур с центральной зоной, а значит, уменьшатся и напряжения. Поэтому центральная зона панели должна нагреться до больших значений, чтобы возникли критические напряжения, то есть время разрушения увеличится.

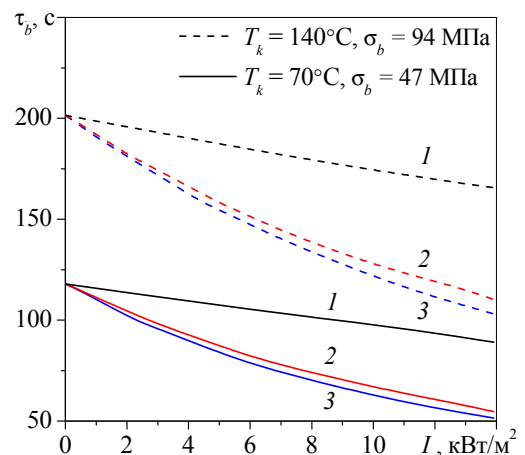


Рис. 4. Зависимость времени достижения критических напряжений в панели от интенсивности падающего излучения при разных длинах поглощения: 1 –  $l = 20$  мм; 2 –  $l = 2$  мм; 3 –  $l = 0,2$  мм

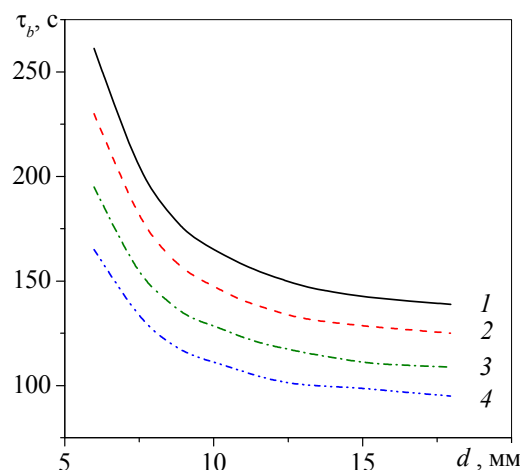


Рис. 5. Зависимость времени достижения критических напряжений в панели от ширины затенения панели при разных длинах поглощения: 1 –  $l = 20$  мм; 2 –  $l = 10$  мм; 3 –  $l = 5$  мм; 4 –  $l = 2$  мм

На рис. 6 представлена зависимость времени  $\tau_b$  от толщины панели при разной ширине затенения панели рамой. Критическая температура  $110^\circ\text{C}$  при  $\sigma_b = 73 \text{ МПа}$ , интенсивность падающего излучения  $10 \text{ кВт/м}^2$ .

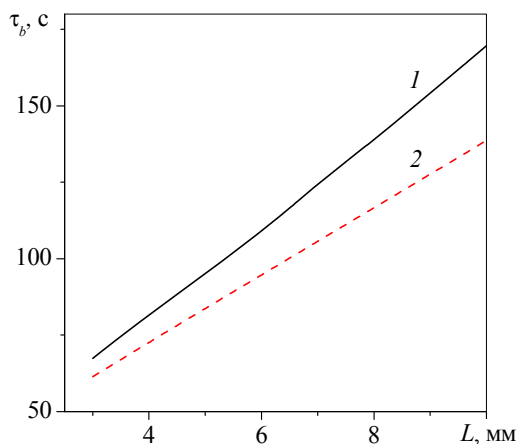


Рис. 6. Зависимость времени достижения критических напряжений в панели от ее толщины при разной ширине затенения панели:  
1 –  $d = 10 \text{ мм}$ ; 2 –  $d = 18 \text{ мм}$

Из приведенных на рис. 5 данных следует, что с увеличением толщины панели время достижения критических напряжений, приводящих к ее разрушению, увеличивается, и тем больше, чем меньше ширина затенения.

**Заключение.** Выполнены расчеты, связанные с анализом термонапряженного состояния ограниченной стеклянной панели с учетом температурной зависимости теплофизических свойств стекла, воздуха и дымовых газов, конструктивных особенностей светопрозрачной конструкции и нелинейного характера изменения температуры окружающей среды при огневом воздействии.

На основе разработанного с помощью пакета FlexPDE программного кода для расчета распределения температуры и напряжений в ограниченной стеклянной панели с учетом температурной зависимости теплофизических характеристик стекла, воздуха и дымовых газов, конструктивных особенностей СПК и нелинейного характера изменения температуры окружающей среды в процессе пожара возможно оценивать время разрушения светопрозрачной конструкции при пожаре.

### Литература

1. Расчет предела огнестойкости светопрозрачной конструкции по критерию потери целостности / А. С. Дмитриченко [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. 2017. № 2 (42). С. 27–37.
2. Joshi A. A., Pagni P. J. Glass Breaking in Fires // Fire Safety Sciences: Proceedings of the Third International Symposium. 1991. P. 791–802.
3. Мартыненко О. Г., Соковичин Ю. А. Свободно-конвективный теплообмен. Справочник. Минск: Наука и техника, 1982. 399 с.
4. Приборы термического анализа группы NETZSCH. URL: <http://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products-solutions.html> (дата обращения: 20.01.2018).
5. 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. P. 1675–1684.
6. Стекло и изделия из него. Метод испытания на огнестойкость: ГОСТ 33000-2014. М.: Стандартинформ, 2015. 13 с.
7. FlexPDE finite element model builder for Partial Differential Equations. URL: <http://www.pdesolutions.com> (дата обращения 15.01.2018).

### References

1. Dmitrichenko A. S., Yanovskiy S. Yu., Chernevich O. V., Kerimov K. D. Calculation of the fire resistance time of translucent structures according to the criterion of the loss of thermal insulation capacity. *Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya* [Emergency situations: prevention and elimination], 2017, no. 2 (42), pp. 27–37 (In Russian).
2. Joshi A. A., Pagni P. J. Glass Breaking in Fires. *Proceedings of the Third International Symposium "Fire Safety Sciences"*, 1991, pp. 791–802.
3. Martynenko O. G., Sokovishin Yu. A. *Svobodno-konvektivnyy teploobmen. Spravochnik* [Free and convective heat exchange. Reference book]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1982. 399 p.
4. *Pribory termicheskogo analiza gruppy NETZSCH* [Devices of the thermal analysis of NETZSCH group]. Available at: <http://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products-solutions.html> (accessed 20.01.2018).
5. 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.
6. GOST 33000-2014. Glass and products from it. A test method on fire resistance. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 13 p. (In Russian).

7. FlexPDE finite element model builder for Partial Differential Equations. Available at: <http://www.pdesolutions.com> (accessed 15.01.2018).

### Информация об авторах

**Дмитриченко Александр Степанович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: [egit@belstu.by](mailto:egit@belstu.by)

**Здитовецкая Светлана Валентиновна** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: [teka\\_11@mail.ru](mailto:teka_11@mail.ru)

**Яновский Сергей Юрьевич** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (220118, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25, Республика Беларусь). E-mail: [yanovskiy@mail.ru](mailto:yanovskiy@mail.ru)

**Керимов Керим Джамалович** – адъюнкт. Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (220118, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25, Республика Беларусь).

### Information about the authors

**Dmitrichenko Aleksandr Stepanovich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Energy-Saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [egit@belstu.by](mailto:egit@belstu.by)

**Zditovetskaya Svetlana Valentinovna** – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Energy-Saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [teka\\_11@mail.ru](mailto:teka_11@mail.ru)

**Yanovskiy Sergey Yur'yevich** – PhD (Physics and Mathematics), Senior Research. University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus (25, Mashinostroiteley str., 220118, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [yanovskiy@mail.ru](mailto:yanovskiy@mail.ru)

**Kerimov Kerim Dzhamalovich** – adjunct. University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus (25, Mashinostroiteley str., 220118, Minsk, Republic of Belarus).

*Поступила 10.05.2018*