

Расчет требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций технологических этажерок предприятий нефтегазовой отрасли на основе оценки времени, требуемого для эвакуации и спасения персонала при пожаре

Алексей Юрьевич Шебеко, Юрий Николаевич Шебеко✉, Андрей Владимирович Зубань

Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Балашиха, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время стандартом ГОСТ Р 12.3.047–2012 регламентирована методика определения требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций, основанная на сравнении значений предела огнестойкости и эквивалентной продолжительности пожара. Однако на практике реализуются ситуации, когда при отсутствии нормативных требований по огнестойкости собственник объекта из экономических соображений готов примириться с потерей своего объекта, снизив требуемые пределы огнестойкости, которые могут быть рассчитаны в соответствии с ГОСТ Р 12.3.047–2012. В этом случае следует, задавшись вероятностями безопасной эвакуации или спасения, сравнивать распределения, с одной стороны, пределов огнестойкости и, с другой стороны, времени эвакуации или спасения.

Методология определения требуемых пределов огнестойкости. Апробирован на примере реальной технологической этажерки предложенный ранее в работе [1] вероятностный метод определения требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций, отличный от приведенного в ГОСТ Р 12.3.047–2012. Метод основан на сравнении распределений таких случайных величин, как расчетное время эвакуации и спасения людей при пожаре на производственном объекте и пределов огнестойкости строительных конструкций.

Расчет требуемых пределов огнестойкости. Представлен пример применения предложенного метода для случая спасения людей, основанный на выполненных полномасштабных экспериментах на реальной технологической этажерке газоперерабатывающего завода [2].

Выводы. Определены требуемые пределы огнестойкости строительных конструкций технологических этажерок одного газоперерабатывающего завода, учитывающие время, требуемое для эвакуации и спасения персонала, а также заданную надежность строительных конструкций, на основе экспериментального определения времени эвакуации и спасения персонала с указанных этажерок при пожаре.

Ключевые слова: надежность строительных конструкций; вероятностный подход; времена эвакуации и спасения; дисперсия величины предела огнестойкости; огнезащита

Для цитирования: Шебеко А.Ю., Шебеко Ю.Н., Зубань А.В. Расчет требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций технологических этажерок предприятий нефтегазовой отрасли на основе оценки времени, требуемого для эвакуации и спасения персонала при пожаре // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 5. С. 58–65. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.58-65

✉ Шебеко Юрий Николаевич, e-mail: yn_shebeko@mail.ru

The calculation of required fire resistance limits for engineering structures of technological pipe racks at oil and gas processing plants on the basis of an evaluation of the time needed for personnel evacuation and rescue in case of fire

Aleksey Yu. Shebeko, Yury N. Shebeko✉, Andrey V. Zuban

All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. GOST R 12.3.047-2012 standard offers a methodology for determination of required fire resistance limits of engineering structures. This methodology is based on a comparison of values of the fire resistance

limit and the equivalent fire duration. However, in practice incidents occur when, in absence of regulatory fire resistance requirements, a facility owner, who has relaxed the fire resistance requirements prescribed by GOST R 12.3.047–2012, is ready to accept its potential loss in fire for economic reasons. In this case, one can apply the probability of safe evacuation and rescue to compare distributions of fire resistance limits, on the one hand, and evacuation and rescue time, on the other hand.

A methodology for the identification of required fire resistance limits. The probabilistic method for the identification of required fire resistance limits, published in work [1], was tested in this study. This method differs from the one specified in GOST R 12.3.047-2012. The method is based on a comparison of distributions of such random values, as the estimated time of evacuation or rescue in case of fire at a production facility and fire resistance limits for engineering structures.

Calculations of required fire resistance limits. This article presents a case of application of the proposed method to the rescue of people using the results of full-scale experiments, involving a real pipe rack at a gas processing plant [2].

Conclusions. The required fire resistance limits for pipe rack structures of a gas processing plant were identified. The calculations took account of the time needed to evacuate and rescue the personnel, as well as the pre-set reliability of structures, given that the personnel evacuation and rescue time in case of fire is identified in an experiment.

Keywords: reliability of building structures; probabilistic approach; evacuation and rescue time; dispersion of the fire resistance limit; fire resistance

For citation: Shebeko A.Yu., Shebeko Yu.N., Zuban A.V. The calculation of required fire resistance limits for engineering structures of technological pipe racks at oil and gas processing plants on the basis of an evaluation of the time needed for personnel evacuation and rescue in case of fire. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):58-65. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.58-65 (rus).

✉ Yury Nikolaevich Shebeko, e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Введение

В настоящее время стандартом ГОСТ Р 12.3.047–2012¹ регламентирована методика определения требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций, основанная на работах [3, 4]. В этих работах реализован вероятностный подход, когда сравниваются не фиксированные значения предела огнестойкости и эквивалентной продолжительности пожара, а распределения указанных величин. Аналогичный принцип реализован в британском руководстве PD 7974-7: 2003². Обобщение основных принципов работ [3, 4] проведено в работе [5], где рассмотрены вероятностные аспекты определения условий пожарной безопасности производственных объектов (например, рассмотрение необходимого и расчетного времени эвакуации как случайных величин). Однако на практике реализуются ситуации, когда при отсутствии нормативных требований по огнестойкости собственник объекта из экономических соображений готов примириться с потерей своего объекта, снизив требуемые пределы огнестойкости, которые могут быть рассчитаны согласно ГОСТ Р 12.3.047–2012. При этом в соответствии с Федеральным законом от 22 июня 2009 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»³ должны быть обеспечены

условия безопасной эвакуации (ст. 6, 53) и проведения мероприятий по спасению людей при пожаре (пп. 2 п. 1 ст. 80). В этом случае следует, задавшись вероятностями безопасной эвакуации или спасения, сравнивать распределения, с одной стороны, пределов огнестойкости и, с другой стороны, времени эвакуации или спасения.

Необходимо отметить, что проблема определения требуемых пределов огнестойкости рассматривалась ранее в работах [6–19]. Однако эти работы основывались на детерминистских моделях и не учитывали, что как пределы огнестойкости, так и параметры, определяющие эквивалентную продолжительность пожара, являются случайными величинами. В работе [1] с учетом результатов исследований [3–5] и упомянутого выше британского руководства² предложен вероятностный метод расчета требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций, основанный на сравнении распределений величин предела огнестойкости и времени эвакуации или спасения людей при пожаре.

В настоящей работе, следуя основным принципам вероятностного подхода, реализованного в работах [1, 3–5], апробирован указанный выше метод определения требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций производственных объектов. При этом рассматривается несущая способность строительных конструкций, что характерно для этажерок и эстакад предприятий нефтегазовой отрасли.

С определенным запасом надежности рассматривается пожар, не ограниченный по длительности количеством пожарной нагрузки. Это вызвано большим количеством пожарной нагрузки, сосредоточенной на объекте нефтегазовой отрасли, и не-

¹ ГОСТ Р 12.3.047–2012. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2012 г. № 1971-ст.

² PD 7974-7: 2003. Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Probabilistic risk assessment. 26 Jun 2003.

³ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22 июня 2009 г. № 123-ФЗ принят Государственной Думой 4 июля 2008 г.; одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 г.

возможностью на данном этапе проектирования достаточно точно определить количество сжиженных газов, легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, которые могут быть вовлечены в пожар.

Методология определения требуемых пределов огнестойкости

Кратко напомним основные положения методики определения требуемых пределов огнестойкости, изложенной в работах [1, 5]. Как и в работах [1, 5], примем, что условие безопасности (расчетное время спасения меньше предела огнестойкости) отражается соотношением параметров x_1 и x_2 , которое записывается в виде:

$$x_1 < x_2, \quad (1)$$

где x_1 — расчетное время эвакуации или спасения;
 x_2 — предел огнестойкости.

Качественная интерпретация условия (1) представлена на рис. 1 [1, 5].

Как было отмечено выше, параметры x_1 и x_2 являются случайными величинами, для которых предполагаются нормальные распределения плотностей вероятности P_1 и P_2 [1]:

$$P_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{(x_1 - x_{10})^2}{2\sigma_1^2}\right), \quad (2)$$

$$P_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left(-\frac{(x_2 - x_{20})^2}{2\sigma_2^2}\right), \quad (3)$$

где σ_1, σ_2 — средние квадратичные отклонения распределений;

x_1 и x_2 — параметры распределения;

x_{10}, x_{20} — центры распределений.

Величина x_{10} для средней величины времени эвакуации рассчитывается методами, регламентированными документом «Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах»⁴.

Величина σ_1 отражает различия в скоростях движения различных групп людей при эвакуации в случае пожара. Для величины x_{10} , характеризующей время спасения людей при пожаре, нет общепринятых методик расчета. Можно сделать лишь экспертное предположение, что время спасения x_{10} будет, по крайней мере, в 2,5–3 раза больше времени эвакуации. Действительно, в случае эвакуации x_{10} — усредненное время самостоятельного движения людей из опасного объекта в безопасную зону. В случае спасения с объекта с малым количеством присутствующего персонала спасатели должны:

⁴ Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : утверждена приказом МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404 с изменениями, утвержденными приказом МЧС России от 14 декабря 2010 г. № 649.

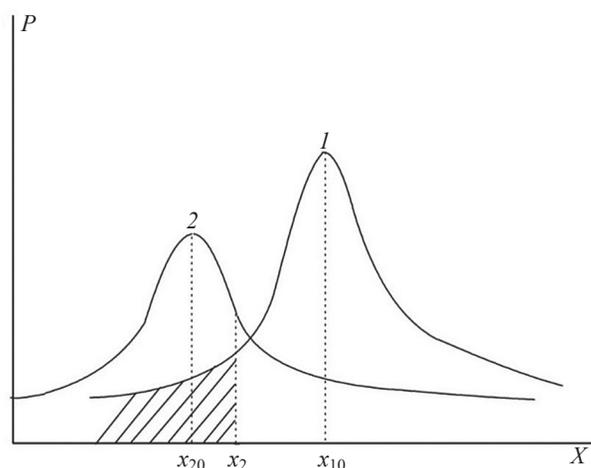


Рис. 1. Качественная интерпретация условия безопасности: 1, 2 — графики функций (2) и (3) соответственно. Заштрихована область под кривой (2), площадь которой численно равна вероятности выполнения условий (1) при заданном x_2 . P — плотность вероятности для рассматриваемых распределений
Fig. 1. The qualitative interpretation of a safety condition: 1, 2 are graphs of functions (2) and (3). A shaded area under the curve (2) is numerically equal to the probability of fulfillment of conditions (1) at the given x_2 value. P is the probability density for the considered distributions

- а) прибыть на объект;
- б) принять решение о путях, по которым будет осуществляться спасение;
- в) совершить движение по намеченным путям, время которого в силу развития пожара может быть заметно выше, чем время движения к месту проведения спасательных работ (например, в связи с блокированием опасными факторами пожара путей, по которым может быть реализовано спасение).

Величина x_{20} для средней величины предела огнестойкости должна быть определена, исходя из заданной вероятности невыполнения условий безопасной эвакуации Q_0 , а также величин x_{10}, σ_1 и σ_2 .

Следуя подходу работ [3–5], разработанному для определения надежности строительных конструкций, вероятность Q_0 невыполнения условия безопасной эвакуации (1) для нормальных распределений (2) и (3) может быть описана соотношением:

$$Q_0 = F(-\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\gamma} \exp(-x^2/2) dx, \quad (4)$$

где $F(-\gamma)$ — функция Лапласа, значения которой могут быть заимствованы из [20];

γ — параметр, описываемый соотношением:

$$\gamma = (x_{20} - x_{10})/\sigma_S, \quad (5)$$

$$\sigma_S = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}. \quad (6)$$

На рис. 2 показана зависимость вероятности Q_0 невыполнения условия безопасной эвакуации (1) от параметра γ (по данным [5]). Эта зависимость

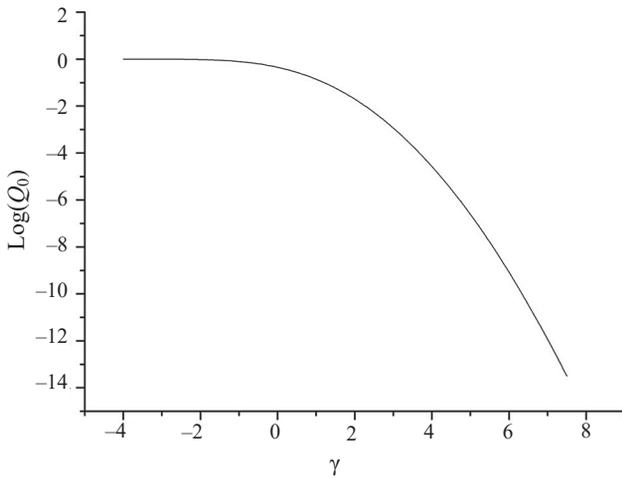


Рис. 2. Зависимость величины вероятности невыполнения условий безопасности от параметра γ

Fig. 2. The dependence of the probability of non-fulfillment of safety conditions on parameter γ

может быть использована для расчета требуемого предела огнестойкости x_{20} .

Для удобства в табл. 1 представлена зависимость параметра γ от величины вероятности невыполнения условий безопасности, рассчитанная по формуле (4).

Метод определения требуемого предела огнестойкости x_{20} заключается в следующем.

Вычисляются расчетное время эвакуации x_{10} и его среднее квадратичное отклонение σ_1 . Далее находится среднее квадратичное отклонение для предела огнестойкости σ_2 . Задается величина Q_0 , исходя из экспертной оценки потери строительными конструкциями своей несущей способности до окончания эвакуации и/или спасения. Из табл. 1 (или исходя из графика, представленного на рис. 2) в зависимости от величины Q_0 находится соответствующий параметр γ . Величину x_{20} затем определяем по формуле, полученной из соотношений (5) и (6):

$$x_{20} = x_{10} + \gamma(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}. \quad (7)$$

Наиболее трудным вопросом для нахождения требуемого предела огнестойкости x_{20} является определение параметров σ_1 и σ_2 , которые, вообще говоря, даже не принимая во внимание процедуру спасения, зависят от качества работ по огнезащите строительных конструкций, контингента эвакуирующихся, знания персоналом имеющихся путей эвакуации. Для случая спасения задача определения параметра σ_1 существенно усложняется в силу

малой изученности временных факторов процесса спасения. В данном исследовании мы используем результаты определения времен эвакуации и спасения с этажерки газоперерабатывающего завода, полученные в работе [2].

Расчет требуемых пределов огнестойкости

Ниже представлен расчет требуемых пределов огнестойкости для несущих конструкций технологических этажерок. При этом использовано определенное в работе [2] время спасения, которое, как отмечено выше, существенно превышает расчетное время эвакуации.

Для расчета, как следует из формулы (7), нужны следующие параметры:

- время спасения x_{10} ;
- параметр γ ;
- средние квадратичные отклонения времени спасения σ_1 и огнестойкости конструкций σ_2 .

Величины x_{10} и σ_1 берем из работы [2], где на основе проведенных экспериментов и расчетов найдены значения указанных параметров, которые составляют $x_{10} = 1924$ с и $\sigma_1 = 227$ с.

Параметр γ находим, используя табл. 1 для заданной надежности строительных конструкций Q_0 . Величина Q_0 определяется, исходя из технико-экономических показателей объекта.

В то же время на основании ГОСТ Р 12.3.047–2012¹ эта величина может быть принята равной 10^{-4} . Поскольку в соответствии с Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании»⁵ стандарт является документом добровольного применения, при необходимости может быть выбрано и иное значение Q_0 . Для наглядности в настоящей работе будут рассчитаны требуемые пределы огнестойкости для различных величин Q_0 .

Параметры x_{10} и σ_1 определены на основании указанных выше экспериментов [2]. При этом мы учитываем сходство объектов в части путей эвакуации с технологических этажерок.

Параметр σ_2 не может быть определен без детального обследования конструкций объекта. Поскольку на данном этапе это представляется затруднительным, примем его на основании данных британского руководства PD 7974-7: 2003². Соглас-

⁵ О техническом регулировании : Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ принят Государственной Думой 15 декабря 2002 г.; одобрен Советом Федерации 18 декабря 2002 г.

Таблица 1. Результаты расчетов параметра γ в зависимости от вероятности Q_0

Table 1. Results of calculations of parameter γ depending on probability Q_0

Q_0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}	10^{-13}
γ	1,28	2,31	3,09	3,71	4,26	4,75	5,19	5,61	5,99	6,36	6,7	7,03	7,34

но этому документу, характерное значение r отношения σ_2 к величине x_{20} принято равным 0,15, в связи с чем рекомендуется использовать в расчетах эту величину. Для иллюстрации расчет x_{20} будет сделан и для других величин. При этом окончательный выбор на основе экспертных оценок может быть сделан проектировщиком.

Результаты расчетов представлены в табл. 2, в строке которой указаны величины Q_0 , а в столбце — значения r . На пересечении строк и столбцов будут указаны соответствующие пределы огнестойкости. На основании этой таблицы может быть сделан выбор необходимой величины, исходя из оценок пожарного риска и технико-экономических показателей. При этом рекомендуется величину Q_0 принять равной 10^{-4} в соответствии с ГОСТ Р 12.3.047–2012¹, а величину r — равной 0,15 в соответствии с британским руководством PD 7974-7: 2003². Результаты соответствующих расчетов представлены ниже в табл. 2, принимая время спасения равным 1924 с в соответствии с данными работы [2].

Некоторые компании предъявляют требования к отношению отклонения предела огнестойкости к его целевой номинальной величине, которое не должно превышать 0,1 ($r = 0,1$). При строительстве объекта при реализации указанного требования и принимая Q_0 равным 10^{-4} в соответствии с табл. P1 ГОСТ Р 12.3.047–2012¹, по табл. 2 данной работы находим, что требуемый предел огнестойкости составляет 58 мин. Используя классификацию п. 1 ст. 35 Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»³ принимаем требуемый предел огнестойкости равным 60 мин. Отметим также, что данный вывод справедлив и в случае, если пределы огнестойкости некоторых конструкций превышают величину требуемого предела, увеличенного на 10 % (т.е. 66 мин).

Ниже для иллюстрации представлен пример расчета требуемого предела огнестойкости несущих конструкций этажей x_{20} при величине надежности строительной конструкции $Q_0 = 10^{-4}$ и величине $r = 0,1$.

Параметр γ принимаем равным 3,71 в соответствии с данными табл. 1 для величины надежности строительной конструкции $Q_0 = 10^{-4}$.

Величины x_{10} и σ_1 берем из работы [2], в которой на основе проведенных экспериментов найдены значения указанных параметров: $x_{10} = 1924$ с и $\sigma_1 = 227$ с. Далее решается уравнение (7) с учетом взаимосвязи параметров x_{20} и σ_2 ($r = \sigma_2/x_{20}$). Корень указанного выше уравнения равен 3459 с (58 мин).

При получении уточненных данных по средним квадратичным отклонениям пределов огнестойкости огнезащищенных конструкций, которые может дать только производитель этих конструкций (или производитель соответствующих средств огнезащиты), рекомендации по выбору требуемых пределов огнестойкости могут быть уточнены.

Выводы

В настоящей работе определены требуемые пределы огнестойкости строительных конструкций технологических этажей одного газоперерабатывающего завода, учитывающие время, требуемое для эвакуации и спасения персонала, а также заданную надежность строительных конструкций, на основе экспериментального определения времен эвакуации и спасения персонала с указанных этажей при пожаре. Получена зависимость требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций от заданной величины надежности строительных конструкций при пожаре.

Исходя из предположения о том, что отношение среднего квадратичного отклонения предела огнестойкости к его целевой номинальной величине не будет превышать 0,1 ($r = 0,1$), и принимая требуемую надежность конструкций равной 10^{-4} в соответствии с табл. P1 ГОСТ Р 12.3.047–2012¹, определена величина требуемого предела огнестойкости, которая составила 58 мин. На основании классификации п. 1 ст. 35 Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»³ требуемый предел огнестойкости может быть

Таблица 2. Результаты расчетов требуемых пределов огнестойкости x_{20} (мин) в зависимости от заданной величины надежности строительных конструкций Q_0 и величины $r = \sigma_2/x_{20}$

Table 2. Results of calculations of required fire resistance values x_{20} (min) depending on the pre-set reliability of structures Q_0 and the value of $r = \sigma_2/x_{20}$

r	Q_0				
	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
0,05	37	42	46	49	52
0,1	39	46	52	58	64
0,15	41	52	64	77	95
0,2	44	62	87	128	221

принят равным 60 мин. Данный вывод справедлив и в случае, если пределы огнестойкости некоторых конструкций превышают величину требуемого предела, увеличенного на 10 % (т.е. 66 мин). Полученные

результаты рекомендуется использовать при проектировании предприятий нефтегазовой отрасли в части определения требуемых пределов огнестойкости для несущих конструкций технологических этажей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Шебеко Ю.Н., Шебеко А.Ю., Гилетич А.Н.* Методы определения требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций производственных объектов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2018. Т. 27. № 11. С. 51–57. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.11.51-57
2. *Лагозин А.Ю., Шебеко Ю.Н., Леончук П.А., Клементьев Б.А., Самошин Д.А.* Экспериментальное исследование процессов эвакуации и спасения людей при пожаре с этажерки технологической линии газоперерабатывающего завода // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 6. С. 69–74. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-6-69-74
3. *Присадков В.И.* Надежность строительных конструкций при пожаре // Огнестойкость строительных конструкций : сб. тр. М. : ВНИИПО, 1986. С. 70–73.
4. *Присадков В.И.* Разработка методов выбора рациональных систем противопожарной защиты промышленных зданий : дис. ... д-ра техн. наук. М. : ВНИИПО, 1990. 290 с.
5. *Шебеко Ю.Н., Шебеко А.Ю.* Условия пожарной безопасности при определении допустимых параметров функционирования производственных объектов // Пожарная безопасность. 2009. № 4. С. 61–66.
6. *Law M.* A Review of Formulae for T- Equivalent // Fire Safety Science. Melbourne, IAFSS, 1997. Vol. 5. Pp. 985–996. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-985
7. *Thomas G.C., Buchanan A.H., Freischmann C.M.* Structural fire design: the role of time equivalence // Fire Safety Science. Melbourne, IAFSS, 1997. Vol. 5. Pp. 607–618. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-607
8. *Cadorin J.F., Perez Jimenez C., Franssen J.M.* Influence of the section and of the insulation type on the equivalent time // Proceedings of the 4th International Seminar on Fire and Explosion Hazards. Ulster : University of Ulster, 2004. Pp. 547–557.
9. *Шебеко А.Ю., Шебеко Ю.Н.* Взаимосвязь величин температуры строительных конструкций при стандартном и углеводородном температурных режимах пожара // Пожарная безопасность. 2017. № 2. С. 41–45.
10. *Шебеко А.Ю., Шебеко Ю.Н., Гордиенко Д.М.* Расчетная оценка эквивалентной продолжительности пожара для стальных конструкций технологической эстакады нефтеперерабатывающего предприятия // Пожарная безопасность. 2017. № 1. С. 25–29.
11. *Шебеко А.Ю., Гилетич А.Н., Шебеко Ю.Н., Гордиенко Д.М.* Требуемые пределы огнестойкости строительных конструкций высотных зданий // Пожарная безопасность. 2012. № 4. С. 31–39.
12. *Correia A.M., Pires T.A.C., Rodrigues J.P.C.* Behavior of steel columns subjected to fire // Proceedings of the 6th International Seminar on Fire and Explosion Hazards. University of Leeds, 2010. Pp. 879–889.
13. *Toric N., Peros B., Boro I.* Reliability of steel structures under fire conditions // Proceedings of the Sixth International Seminar on Fire and Explosion Hazards. University of Leeds, 2010. Pp. 890–901. DOI: 10.3850/978-981-08-7724-8_13-02
14. *Баратов А.Н., Молчадский И.С.* Горение на пожаре. М. : ВНИИПО, 2011. 502 с.
15. *Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В., Брешина В.Н., Шкутова Т.В.* Обеспечение нормируемой огнестойкости стальных конструкций основания резервуаров в условиях температурного режима углеводородного пожара // Пожарная безопасность. 2018. № 2. С. 17–25.
16. *Qing Xu, Guo-Qiang Li, Jian Jiang, Yong Wang.* Experimental study of the influence of topcoat on insulation performance of intumescent coatings for steel structures // Fire Safety Journal. 2018. Vol. 101. No. 1. Pp. 25–38. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.08.006
17. *Meijing Lui, Shenggang Fan, Wenjun Sun, Rummin Ding, Ting Zhu.* Fire-resistant design of eccentrically compressed stainless steel columns with constraints // Fire Safety Journal. 2018. Vol. 100. No. 1. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.06.006

18. Maciulaitis R., Grigonis M., Malaskiene J. The impact of the aging of intumescent fire protective coatings on fire resistance // *Fire Safety Journal*. Vol. 98. No. 1. Pp. 15–23. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.03.007
19. Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions // *Fire Safety Journal*. 2018. Vol. 95. No. 1. Pp. 42–50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004
20. Янке Е., Элиде Ф., Леш Ф. Специальные функции. М. : Наука, 1968. 342 с.

REFERENCES

1. Shebeko Yu.N., Shebeko A.Yu., Giletich A.N. Method of a determination of required fire resistance limits for building structures of industrial objects. *Pozharovzrivobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(11):51-57. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.11.51-57 (rus).
2. Lagozin A.Yu., Shebeko Yu.N., Leonchuk P.A., Klementev B.A., Samoshin D.A. Experimental study of the processes of evacuation and rescue of people in case of fire from the pipe rack of the technological line of the gas processing plant. *Occupational Safety in Industry*. 2021; 6:69-74. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-6-69-74 (rus).
3. Prasadkov V.I. A realibility of building structures at a fire. *Fire resistances of building structures*. Moscow, VNIPO, 1986; 70-73. (rus).
4. Prasadkov V.I. *A creation of methods for a choice of an optimal fire protection system for industrial buildings : dissertation of doctor of technical sciences*. Moscow, VNIPO, 1990, 290. (rus).
5. Shebeko Yu.N., Shebeko A.Yu. About the fire safety conditions to determine the admissible parameters of industrial premises functioning. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2009; 4:61-66. (rus).
6. Law M.A. A Review of Formulae for T-Equivalent. *Fire Safety Science*. Melbourne, IAFSS, 1997; 5:985-996. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-985
7. Thomas G.C., Buchanan A.N., Freischmann C.M. Structural fire design: the role of time equivalence. *Proceedings of the 5th International Symposium on Fire Safety Science*. Melbourne, IAFSS, 1997; 5:607-618. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-607
8. Cadorin J.F., Perez Jimenez C., Franssen J.M. Influence of the section and of the insulation type on the equivalent time. *Proceedings of the 4th International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. Ulster, University of Ulster, 2004; 547-557.
9. Shebeko A.Yu., Shebeko Yu.N. A relationship of a temperature of building constructions at a standard and a hydrocarbon regimes of a fire. *Pozharnaya Bezopasnost/Fire Safety*. 2017; 1:25-29. (rus).
10. Shebeko A.Yu., Shebeko Yu.N., Gordienko D.M. A settlement assessment of equivalent fire duration for steel structures of pipe rack of a refinery. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2012; 4:31-39. (rus).
11. Shebeko A.Yu., Giletich A.N., Shebeko Yu.N., Gordienko D.M. The required fire resistance limits for the high-rise buildings structures. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2012; 4:31-39. (rus).
12. Correia A.M., Pires T.A.C., Rodrigues J.P.C. Behavior of steel columns subjected to fire. *Proceedings of the 6th International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. University of Leeds, 2010; 879-889.
13. Toric N., Peros B., Boro I. Realibility of steel structures under fire conditions. *Proceedings of the Sixth International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. University of Leeds, 2010; 890-901. DOI: 10.3850/978-981-08-7724-8_13-02
14. Baratov A.N., Molchadsky I.S. *Combustion at a fire*. Moscow, VNIPO, 2011; 502. (rus).
15. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V., Breshina V.N., Shkutova T.V. Ensuring the normable fire resistance of tank base steel structures in conditions of temperature regime of hydrocarbon fire. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2018; 2:17-25. (rus).
16. Qing Xu, Guo-Qiang Li, Jian Jiang, Yong Wang. Experimental study of the influence of topcoat on insulation performance of intumescent coatings for steel structures. *Fire Safety Journal*. 2018; 101(1):25-38. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.08.006
17. Meijing Lui, Shenggang Fan, Wenjun Sun, Rummin Ding, Ting Zhu. Fire-resistant design of eccentrically compressed stainless steel columns with constraints. *Fire Safety Journal*. 2018; 100(1):1-19. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.06.006
18. Maciulaitis R., Grigonis M., Malaskiene J. The impact of the aging of intumescent fire protective coatings on fire resistance. *Fire Safety Journal*. 2018; 98(1):15-23. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.03.007

19. Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions. *Fire Safety Journal*. 2018; 95(1):42-50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004
20. Yanke E., Elide F., Lesh F. *Special functions*. Moscow, Nauka publ., 1968; 342. (rus).

*Поступила 06.07.2021, после доработки 29.07.2021;
принята к публикации 09.08.2021*

*Received July 6, 2021; Received in revised form July 29, 2021;
Accepted August 9, 2021*

Информация об авторах

ШЕБЕКО Алексей Юрьевич, д-р техн. наук, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 184443; Scopus Author ID: 14627996600; Researcher ID: G-1975-2016; ORCID: 0000-0002-5771-2127; e-mail: ay_shebeko@mail.ru

ШЕБЕКО Юрий Николаевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 47042; Scopus Author ID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn_shebeko@mail.ru

ЗУБАНЬ Андрей Владимирович, канд. техн. наук, начальник отдела, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 774306; Scopus Author ID: 55847911600; Researcher ID: AAB-9575-2019; ORCID: 0000-0002-7799-2058; e-mail: avzuban@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Aleksey Yu. SHEBEKO, Dr. Sci. (Eng.), All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, 143903, Russian Federation; ID RISC: 184443; Scopus Author ID: 14627996600; Researcher ID: G-1975-2016; ORCID: 0000-0002-5771-2127; e-mail: ay_shebeko@mail.ru

Yury N. SHEBEKO, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, 143903, Russian Federation; ID RISC: 47042; Scopus Author ID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Andrey V. ZUBAN, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, 143903, Russian Federation; ID RISC: 774306; Scopus Author ID: 55847911600; Researcher ID: AAB-9575-2019; ORCID: 0000-0002-7799-2058; e-mail: avzuban@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.