

Расчет фактического предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций при различных температурных режимах пожара

© Ю. Н. Шебеко, А. В. Зубань, А. Ю. Шебеко 

Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России
(Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12)

РЕЗЮМЕ

Введение. В соответствии с требованиями СП 2.13130.2012 (п. 5.4.3) допускается применение незащищенных стальных конструкций, если требуемый предел их огнестойкости составляет R 15 (RE 15, EI 15). Однако фактический предел огнестойкости зависит как от приведенной толщины конструкции, так и от температурно-режима пожара (“целлюлозный” или углеводородный). Работа посвящена расчетной оценке фактического предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций для температурных режимов, соответствующих стандартным “целлюлозному” и углеводородному пожарам, в зависимости от приведенной толщины конструкций.

Методика расчета и полученные результаты. Численное моделирование прогрева конструкций проводили с помощью программного комплекса FDS 6. Рассматривались стальные незащищенные конструкции с приведенной толщиной $\delta_{кр}$ от 3 до 60 мм. Предел огнестойкости устанавливали по достижении конструкцией температуры 500 °С. Получены зависимости фактического предела огнестойкости конструкции от ее приведенной толщины $\delta_{кр}$, который для углеводородного режима пожара оказался существенно ниже, чем для “целлюлозного”. Найдена зависимость отношения пределов огнестойкости для углеводородного и “целлюлозного” пожаров от приведенной толщины строительной конструкции.

Заключение. Результаты работы подтверждают обоснованность требований СП 2.13130.2012 (п. 5.4.3) в части возможности применения незащищенных стальных конструкций, если требуемый предел огнестойкости составляет R 15 (RE 15, EI 15) для “целлюлозного” пожара. В то же время для углеводородного режима пожара данное требование неприменимо.

Ключевые слова: “целлюлозный” пожар; углеводородный пожар; приведенная толщина конструкции; FDS 6; прогрев конструкции.

Для цитирования: Шебеко Ю. Н., Зубань А. В., Шебеко А. Ю. Расчет фактического предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций при различных температурных режимах пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 6. — С. 29–34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.29-34.

 Шебеко Алексей Юрьевич, e-mail: ay_shebeko@mail.ru

An evaluation of an actual fire resistance limit of non-protected steel structures for different temperature regimes of fires

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

All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia
(VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. A normative document Set of Rules 2.13130.2012 (item 5.4.3) states that if an required fire resistance limit of structures is equal to R 15 (RE 15, EI 15) an application of non-protected steel structures is possible. But an actual fire resistance limit depends both on a reduced thickness of the structure and a temperature regime of a fire (for example “cellulose” or hydrocarbon regime). This study is aimed on a numerical evaluation of the actual fire resistance limit of the non-protected steel structures for the standard “cellulose” and hydrocarbon temperature regimes of fires at various reduced thickness of the structures.

Methodology and results. A numerical modeling of a heating of the structures was carried out using the software FDS 6. The non-protected steel structures having the reduced thickness δ_{cr} from 3 to 60 mm were considered. The fire resistance limits were determined as a time interval from a beginning of the fire to the time moment when the temperature of the structure reaches a value of 500 °C. Dependences of the actual fire resistance limits on δ_{cr} were obtained. These limits for the hydrocarbon fire were substantially lower than for “cellulose” one. A dependence of a ratio of the fire resistance limits for the hydrocarbon and “cellulose” fires on the reduced thickness of the structure was found.

Conclusion. The results of this study confirm the requirement of the normative document Set of Rules 2.13130.2012 (item 5.4.3) concerning a possibility of the application of the non-protected steel structures in the case when the required fire resistance limit is equal to R 15 (RE 15, REI 15), but only for the “cellulose” fire. But this requirement is not valid for the hydrocarbon fire.

Keywords: “cellulose” fire; hydrocarbon fire; reduced thickness of a structure; software FDS 6; temperatures of steel structures.

For citation: Yu. N. Shebeko, A. V. Zuban, A. Yu. Shebeko. An evaluation of an actual fire resistance limit of non-protected steel structures for different temperature regimes of fires. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 6, pp. 29–34 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.29-34.

✉ Aleksey Yuryevich Shebeko, e-mail: ay_shebeko@mail.ru

Введение

В соответствии с требованиями нормативных документов по пожарной безопасности (см., например, п. 5.4.3 СП 2.13130.2012 “Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты”), если требуемый предел огнестойкости конструкций (за исключением конструкций в составе противопожарных преград) составляет R 15 (RE 15, REI 15), допускается применять незащищенные стальные конструкции независимо от их фактического предела огнестойкости. Исключением являются случаи, когда предел огнестойкости хотя бы одного из элементов несущих конструкций (структурные элементы ферм, балок, колонн и т. п.) по результатам испытаний составляет менее R 8. Однако на практике последним условием зачастую пренебрегают и принимают предел огнестойкости для незащищенных стальных конструкций равным R 15. Кроме того, недостаточно ясно, как фактический предел огнестойкости незащищенных стальных конструкций зависит от их приведенной толщины $\delta_{кр}$ (мм). При этом величина R 15 может быть как избыточной (при больших значениях $\delta_{кр}$), так и недостаточной (при малых значениях $\delta_{кр}$). Данные по фактическому пределу огнестойкости стальных незащищенных конструкций при различных значениях $\delta_{кр}$, представленные в [1], относятся к стандартному температурному режиму так называемого “целлюлозного” пожара (см. ISO 834-1:1999 “Испытания на огнестойкость. Элементы строительных конструкций. Часть 1. Общие требования”; ГОСТ 30247.0–94 “Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования”). В то же время незащищенные стальные конструкции зачастую используются на предприятиях нефтегазового комплекса, для которых характерен углеводородный температурный режим пожара (см. ГОСТ Р ЕН 1363-2–2014 “Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Часть 2. Альтернативные и дополнительные методы”). Однако в литературе для такого случая отсутствует зависимость предела огнестойкости от приведенной толщины конструкции $\delta_{кр}$.

В работе [2] представлен инженерный метод расчета пределов огнестойкости стальных конструкций и для стандартного “целлюлозного” пожара

вычислены температуры конструкций, имеющих различные приведенные толщины. Вопросы оценки огнестойкости стальных конструкций, а также поведения строительных конструкций (в том числе стальных незащищенных) при пожаре освещались и в работах [3–16], но тоже в основном для случая стандартного “целлюлозного” пожара. И лишь в работах [17–19] рассматриваются иные температурные режимы пожара.

В связи с вышеизложенным настоящая работа посвящена расчетной оценке фактического предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций для температурных режимов, соответствующих стандартным “целлюлозному” и углеводородному пожарам.

Методика расчета и полученные результаты

Проведено численное моделирование прогрева незащищенных стальных конструкций, имеющих различные приведенные толщины $\delta_{кр}$, при воздействии стандартных “целлюлозного” и углеводородного пожаров. Использован программный комплекс FDS 6 [20]. Температурные режимы “целлюлозного” и углеводородного пожаров описывались соотношениями:

- “целлюлозный” режим (ГОСТ 30247.0–94):

$$T = T_0 + 345 \log(8t + 1); \quad (1)$$

- углеводородный режим (ГОСТ Р ЕН 1363-2–2014):

$$T = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20, \quad (2)$$

где T , T_0 — текущая и начальная температуры, °C;
 t — время от начала пожара, мин.

Рассмотрены стальные незащищенные конструкции с приведенной толщиной от 3 до 60 мм. Предел огнестойкости определялся по достижении конструкцией температуры 500 °C (ГОСТ Р 53295–2009 “Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Методы определения огнезащитной эффективности”).

На рис. 1 представлена зависимость фактического предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций от их приведенной толщины при

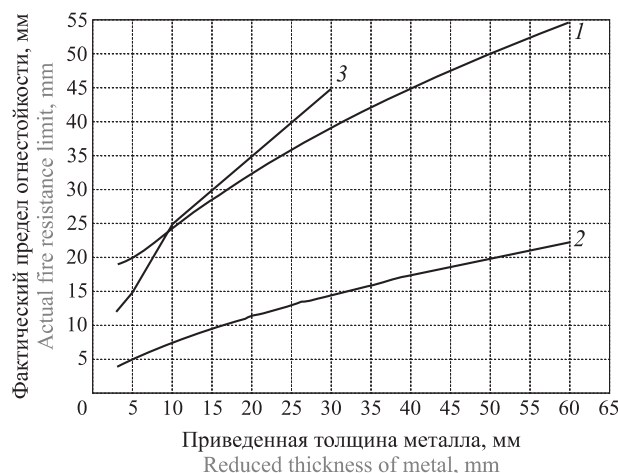


Рис. 1. Зависимость фактического предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций от их приведенной толщины при воздействии стандартных “целлюлозного” (1) и углеводородного (2) пожаров и по данным работы [1] (3)
 Fig. 1. Dependence of the actual fire resistance limit of the non-protected steel structures on their reduced thickness at an action of the standard “cellulose” (1) and hydrocarbon (2) fires, and on data [1] (3)

воздействии стандартных “целлюлозного” (кривая 1) и углеводородного (кривая 2) пожаров. На рис. 1 для сравнения представлены также данные работы [1, с. 356] для стандартного “целлюлозного” пожара (кривая 3). Видно, что с увеличением приведенной толщины конструкции $\delta_{кр}$ фактический предел огнестойкости заметно возрастает. Обращает на себя внимание и тот факт, что для стандартного “целлюлозного” пожара рассчитанный предел огнестойкости превышает 15 мин. В соответствии с СП 2.13130.2012 (п. 5.4.3), если требуемый предел огнестойкости конструкции (за исключением конструкции в составе противопожарных преград) составляет R 15 (RE 15, REI 15), допускается применять незащищенные стальные конструкции независимо от их фактического предела огнестойкости. Исключение составляют случаи, когда предел огнестойкости хотя бы одного из элементов несущих конструкций по результатам испытаний менее R 8. Результаты расчетов, выполненных в настоящей работе, подтверждают правильность этого требования для случая стандартного “целлюлозного” пожара. В то же время применение данного требования для стандартного углеводородного пожара может привести к ошибочным результатам, так как фактический предел огнестойкости (см. рис. 1) может быть менее 15 мин. Следует отметить удовлетворительное согласие результатов, полученных в настоящей работе для стандартного “целлюлозного” пожара, с данными, приведенными в [1] (см. рис. 1, кривые 1 и 3).

В работе [19] найдено приближенное соотношение между температурами строительных конструк-

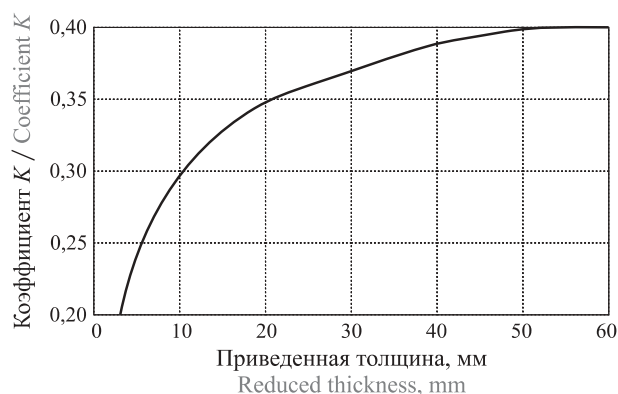


Рис. 2. Зависимость коэффициента K от приведенной толщины конструкции
 Fig. 2. Dependence of the coefficient K on the reduced thickness of the structure

ций при воздействии на них стандартных “целлюлозного” и углеводородного пожаров:

$$t_h = K t_s, \quad (3)$$

где t_h , t_s — времена достижения одной и той же температуры соответственно для углеводородного и “целлюлозного” режимов пожара;

K — коэффициент, равный 0,6 для бетонной конструкции и 0,28 для стальной незащищенной конструкции.

Соотношение (3) может быть распространено и на рассматриваемый случай. При этом для стальной незащищенной конструкции коэффициент K может зависеть от ее приведенной толщины.

Для определения зависимости коэффициента K от приведенной толщины конструкции (рис. 2) использованы данные, представленные на рис. 1 (кривые 1 и 2).

Из рис. 2 видно, что коэффициент K зависит от приведенной толщины строительной конструкции $\delta_{кр}$. При этом при $\delta_{кр}$ более 30 мм эта зависимость довольно слабая, и в этом случае величина K может быть принята приближенно равной 0,39.

Выводы

В настоящей работе с помощью программного комплекса FDS 6 проведено численное моделирование воздействия стандартных “целлюлозного” и углеводородного пожаров на стальные незащищенные строительные конструкции при их различных приведенных толщинах $\delta_{кр}$. Найдено, что для “целлюлозного” пожара фактический предел огнестойкости превышает 15 мин при $\delta_{кр} = 5$ мм, что подтверждает обоснованность допущения СП 2.13130.2012 о применении незащищенных стальных конструкций для данного температурного режима пожара. В то же время для углеводородного пожара это допущение неприемлемо. Найдена зависимость между пределами огнестойкости для “целлюлозного” и уг-

леводородного пожаров при различной приведенной толщине конструкций. Результаты работы свидетельствуют о необходимости корректировки п. 5.4.3

СП 2.13130.2012 в части применения стальных незащищенных конструкций для зданий и сооружений, для которых характерен углеводородный пожар.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Молчадский И. С. Пожар в помещении. — М. : ВНИИПО, 2005. — 456 с.
2. Голованов В. И., Павлов В. В., Пехотиков А. В. Инженерный метод расчета огнестойкости стальных конструкций с огнезащитными плитами КНАУФ-Файерборд // Пожарная безопасность. — 2016. — № 3. — С. 171–178.
3. Голованов В. И., Павлов В. В., Пехотиков А. В. Оценка качества нанесения средств огнезащиты на стальные конструкции зданий и сооружений различного функционального назначения // Пожарная безопасность. — 2015. — № 3. — С. 74–82.
4. Голованов В. И., Пехотиков А. В., Павлов В. В. Расчет огнестойкости конструкций из стали с повышенными показателями огнестойкости для объектов нефтегазовой промышленности // Территория НЕФТЕГАЗ. — 2007. — № 4. — С. 72–77.
5. Хасанов И. Р., Голованов В. И. Обеспечение огнестойкости несущих строительных конструкций // Юбилейный сборник трудов ФГБУ ВНИИПО МЧС России. — М. : ВНИИПО, 2012. — С. 81–101.
6. PD 7974-7:2003. Application of fire safety engineering principles to the design of buildings — Part 7: Probabilistic risk assessment. — London : British Standards Institution, 2003. — 88 p.
7. Law M. A review of formulae for T-equivalence // Fire Safety Science. — 1997. — Vol. 5. — P. 985–996. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-985.
8. Thomas G. C., Buchanan A. H., Fleischmann C. M. Structural fire design: the role of time equivalence // Fire Safety Science. — 1997. — Vol. 5. — P. 607–618. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-607.
9. Shebeko Yu. N., Shebeko A. Yu. Conditions of fire and explosion safety at a determination of operation parameters of industrial facilities // Science and Technology of Energetic Material. — 2011. — Vol. 72, No. 2. — P. 57–61.
10. 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. — P. 547–557.
11. Yang You-Fu, Fu Feng. Fire resistance of steel beam to square CFST column composite joints using RC slabs: Experiments and numerical studies // Fire Safety Journal. — 2019. — Vol. 104. — P. 90–108. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.01.009.
12. 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.
13. Correia A. M., Pires T. A. C., Rodrigues J. P. C. Behaviour of steel columns subjected to fire // Proceedings of the Sixth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (April 11–16, 2010, Leeds, UK) / D. Bradley, G. Makhviladze, V. Molkov (eds.). — Leeds : Research Publishing, 2011. — P. 879–890. DOI: 10.3850/978-981-08-7724-8_13-01.
14. Qing Xu, Guo-Qiang Li, Jian Jiang, Yong C. Wang. Experimental study of the influence of topcoat on insulation performance of intumescent coating for steel structures // Fire Safety Journal. — 2018. — Vol. 101. — P. 25–38. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.08.006.
15. Meijing Liu, Shenggang Fan, Wenjun Sun, Runmin Ding, Ting Zhu. Fire-resistant design of eccentrically compressed stainless steel columns with constraints // Fire Safety Journal. — 2018. — Vol. 100. — P. 1–19. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.06.006.
16. Maciulaitis R., Grigonis M., Malaikiene J. The impact of the aging of intumescent fire protective coatings on fire resistance // Fire Safety Journal. — 2018. — Vol. 98. — P. 15–23. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.03.007.
17. 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. — P. 42–50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004.
18. Quil S. E., Yokoyama T., Bregman L. S., Mueller K. A., Marjanishvili S. M. A streamlined frame work for calculating the response of steel-supported bridges to open-car tanker truck fires // Fire Safety Journal. — 2015. — Vol. 73. — P. 63–75. DOI: 10.1016/j.firesaf.2015.03.004.

19. Шебеко А. Ю., Шебеко Ю. Н. Взаимосвязь величин температуры строительных конструкций при стандартном и углеводородном температурных режимах пожара // Пожарная безопасность. — 2017. — № 2. — С. 46–49.
20. McGrattan K. B., McDermott R. J., Weinschenk C. G., Forney G. P. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide (version 6.1) / NIST Special Publication-1018. — Gaithersburg, Maryland : National Institute of Standards and Technology, 2013.

REFERENCES

1. I. S. Molchadskiy. *Pozhar v pomeshchenii* [Fire in a room]. Moscow, VNIPO Publ., 2005. 456 p. (in Russian).
2. V. I. Golovanov, V. V. Pavlov, A. V. Pekhotikov. Engineering method for designing fire resistance of steel constructions protected by KNAUF-Fireboard plates. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2016, no. 3, pp. 171–178 (in Russian).
3. V. I. Golovanov, V. V. Pavlov, A. V. Pekhotikov. Assessment of quality application of fire protection means on steel constructions of buildings and structures of various functional purposes. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2015, no. 3, pp. 74–82 (in Russian).
4. V. I. Golovanov, A. V. Pekhotikov., V. V. Pavlov. A calculation of a fire resistance of steel structures with elevated indexes of the fire resistance for oil and gas industrial objects. *Territorija NEFTEGAS / Oil and Gas Territory*, 2007, no. 4, pp. 72–77 (in Russian).
5. I. R. Khasanov, V. I. Golovanov. A fire resistance ensuring of bearing structures. In: *Yubileyny sbornik trudov FGBU VNIPO MChS Rossii* [Anniversary Proceedings of All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia]. Moscow, VNIPO Publ., 2012, pp. 81–101 (in Russian).
6. PD 7974-7:2003. Application of fire safety engineering principles to the design of buildings — Part 7: Probabilistic risk assessment. London, British Standards Institution, 2003, 88 p.
7. M. Law. A review of formulae for T-equivalence. *Fire Safety Science*, 1997, vol. 5, pp. 985–996. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-985.
8. G. C. Thomas, A. H. Buchanan, C. M. Fleischmann. Structural fire design: the role of time equivalence. *Fire Safety Science*, 1997, vol. 5, pp. 607–618. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-607.
9. Yu. N. Shebeko, A. Yu. Shebeko. Conditions of fire and explosion safety at a determination of operation parameters of industrial facilities. *Science and Technology of Energetic Material*, 2011, vol. 72, no. 2, pp. 57–61.
10. J. F. Cadorin, C. Jimenez Perez, J. M. Franssen. Influence of the section and of the insulation type on the equivalent time. In: *Proceedings of the 4th International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. Ulster, University of Ulster, 2004, pp. 547–557.
11. You-Fu Yang, Feng Fu. Fire resistance of steel beam to square CFST column composite joints using RC slabs: Experiments and numerical studies. *Fire Safety Journal*, 2019, vol. 104, pp. 90–108. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.01.009.
12. A. Yu. Shebeko., Yu. N. Shebeko, D. M. Gordienko. A settlement assessment of equivalent fire duration for steel structures of pipe rack of a refinery. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2017, no. 1, pp. 25–29 (in Russian).
13. A. M. Correia, T. A. C. Pires, J. P. C. Rodrigues. Behaviour of steel columns subjected to fire. In: D. Bradley, G. Makhviladze, V. Molkov (eds.). *Proceedings of the Sixth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (April 11–16, 2010, Leeds, UK)*. Leeds, Research Publishing, 2011, pp. 879–890. DOI: 10.3850/978-981-08-7724-8_13-01.
14. Qing Xu, Guo-Qiang Li, Jian Jiang, Yong C. Wang. Experimental study of the influence of topcoat on insulation performance of intumescent coating for steel structures. *Fire Safety Journal*, 2018, vol. 101, pp. 25–38. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.08.006.
15. Meijing Liu, Shenggang Fan, Wenjun Sun, Runmin Ding, Ting Zhu. Fire-resistant design of eccentrically compressed stainless steel columns with constraints. *Fire Safety Journal*, 2018, vol. 100, pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.06.006.
16. R. Maciulaitis, M. Grigonis, J. Malaiskiene. The impact of the aging of intumescent fire protective coatings on fire resistance. *Fire Safety Journal*, 2018, vol. 98, pp. 15–23. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.03.007.
17. A. Lucherini, L. Giuliani, G. Jomaas. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions. *Fire Safety Journal*, 2018, vol. 95, pp. 42–50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004.

18. S. E. Quiel, T. Yokoyama, L. S. Bregman, K. A. Mueller, S. M. Marjanishvili. A streamlined frame work for calculating the response of steel-supported bridges to open-car tanker truck fires. *Fire Safety Journal*, 2015, vol. 73, pp. 63–75. DOI: 10.1016/j.firesaf.2015.03.004.
19. A. Yu. Shebeko, Yu. N. Shebeko. Relationship of temperatures of building structures at the standard and hydrocarbon regimes of fires. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2017, no. 2, pp. 46–49 (in Russian).
20. K. B. McGrattan, R. J. McDermott, C. G. Weinschenk, G. P. Forney. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide (version 6.1). *NIST Special Publication-1018*. Gaithersburg, Maryland, National Institute of Standards and Technology, 2013.

*Поступила 14.10.2019, после доработки 18.11.2019;
принята к публикации 28.11.2019*

*Received 14 October 2019; Received in revised form 18 November 2019;
Accepted 28 November 2019*

Информация об авторах

ШЕБЕКО Юрий Николаевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха Московской обл., Российская Федерация; Author ID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn_shebeko@mail.ru

ЗУБАНЬ Андрей Владимирович, канд. техн. наук, заместитель начальника отдела ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха Московской обл., Российская Федерация; Researcher ID: AAB-9575-2019; Author ID: 55847911600; ORCID: 0000-0002-7799-2058; e-mail: avzuban@mail.ru

ШЕБЕКО Алексей Юрьевич, канд. техн. наук, начальник отдела ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха Московской обл., Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-5771-2127; Researcher ID: G-1975-2016; Author ID: 14627996600; e-mail: ay_shebeko@mail.ru

Information about the authors

Yury N. SHEBEKO, Doctor Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; Author ID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Andrey V. ZUBAN, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of Department, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; Researcher ID: AAB-9575-2019; Author ID: 55847911600; ORCID: 0000-0002-7799-2058; e-mail: vzuban@mail.ru

Aleksey Yu. SHEBEKO, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5771-2127; Researcher ID: G-1975-2016; Author ID: 14627996600; e-mail: ay_shebeko@mail.ru