

# Исследование огнестойкости стальных конструкций покрытия складского здания в условиях различного температурного воздействия

© Д.А. Минайлов✉

Судебно-экспертное учреждение Федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по Калининградской области (Россия, 236010, г. Калининград, ул. Бассейная, д. 35а)

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** В процессе проектирования складских зданий требуется оценить соответствие фактических пределов огнестойкости строительных конструкций требуемым пределам огнестойкости с учетом принятых проектных решений. Определение пределов огнестойкости (фактических) строительных конструкций производится в условиях воздействия «стандартного» температурного режима, применение которых может привести к закладыванию в проект завышенного запаса по огнестойкости и к недооценке теплового воздействия в условиях реального пожара.

**Цели и задачи.** Цель исследования — оценка сходимости «стандартного» температурного режима и возможных «реальных» температурных режимов пожаров в современных складских зданиях, а также соответствия фактических пределов огнестойкости воздействию реальных пожаров. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: проведено математическое моделирование развития реального пожара полевым методом в складском здании при различной пожарной нагрузке, а также моделирование прогрева несущих конструкций покрытия при «стандартном» температурном режиме и полученных в процессе моделирования «реальных» температурных режимах пожара; определены требуемые пределы огнестойкости несущих строительных конструкций покрытия через эквивалентную продолжительность пожара.

**Методы.** В качестве объекта исследования было выбрано складское здание типовой формы размерами 12×12×6,5 м. В здании предусмотрены ворота размером 4×4 метра в количестве 2 шт. и входная дверь размером 1×2 м. В стенах здания размещены 32 окна размерами 0,7×1 м. Покрытие — беспрогонная плоская кровля на металлических фермах покрытия. Параметры пожарной нагрузки при математическом моделировании принимались по справочным данным Ю.А. Кошмарова. Рассмотрено 12 видов типовой пожарной нагрузки. Для математического моделирования «реальных» температурных режимов пожара использовался программный комплекс Fire Dynamics Simulator (FDS), реализующий полевую (дифференциальную) математическую модель. Для математического моделирования процесса прогрева стальных строительных конструкций применялся конечно-разностный метод решения уравнения теплопроводности Фурье при внешней и внутренней нелинейности, реализованный в программном комплексе ANSYS Mechanical.

**Результаты и обсуждение.** Результаты математического моделирования в программном комплексе FDS показывают, что температурное воздействие, оказываемое на конструкцию при «стандартном» температурном режиме и таких пожарных нагрузках, как кабели и провода, индустриальное масло, этиловый спирт, оказалось ниже, что указывает на недооценку теплового воздействия на конструкцию. Результаты моделирования прогрева конструкций продемонстрировали, что время прогрева фермы покрытия до 400...700 °С для указанных пожарных нагрузок (кабели и провода, индустриальное масло, этиловый спирт) меньше времени, полученного в результате стандартных испытаний, что указывает на изначальное занижение фактической огнестойкости стальных конструкций покрытия при проектировании складских зданий.

**Заключение.** Предположение о недооценке теплового воздействия при «стандартном» температурном режиме на стальные конструкции современных складских комплексов подтвердилось для 3 из 12 рассмотренных пожарных нагрузок, а именно: кабелей и проводов, индустриального масла, этилового спирта.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование; FDS; ANSYS; пожарная нагрузка; температурный режим пожара; оценка предела огнестойкости; требуемый предел огнестойкости; эквивалентная продолжительность пожара

**Для цитирования:** Минайлов Д.А. Исследование огнестойкости стальных конструкций покрытия складского здания в условиях различного температурного воздействия // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 54–65. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.54-65

✉ Минайлов Денис Александрович, e-mail: minailov-denis@mail.ru

## Investigation of fire resistance of steel structures covering a warehouse building under different temperature conditions

© Denis A. Minailov✉

Forensic institutions Federal Fire Service "Fire testing laboratory" of Kaliningrad Region (Russian Federation, 236010, Kaliningrad, Basseynaya St., 35 a)

## ABSTRACT

**Introduction.** In the process of designing warehouse buildings, taking into account the adopted design decisions, it is required to assess the compliance of the actual fire resistance limits of building structures with the required fire resistance

limits. The fire resistance limits of the (actual) building structures are determined under the influence of a “standard” temperature regime, the use of which can lead to both laying an overestimated fire resistance margin in a project and underestimating the thermal effect in a “real” fire.

**Aims and purposes.** The purpose of the study is to assess the convergence of the “standard” temperature regime and possible “real” temperature regimes of fires in modern warehouse buildings, as well as the correspondence of actual fire resistance limits to the effects of “real” fires. To achieve this goal, the following tasks were solved: mathematical modeling of the development of a “real” fire by the field method in a warehouse building at different fire loads was carried out, as well as modeling of heating of the supporting structures of the coating according to the standard temperature regime and the “real” temperature conditions of the fire obtained during the simulation; the required fire resistance limits of the bearing building structures of the coating are determined through the equivalent duration of the fire.

**Methods.** A storage building of a standard form with dimensions of 12×12×6.5 m was chosen as the object of the study. The building has a 4×4 meter gate in the amount of 2 pieces and an entrance door of 1×2 meter size. Within the walls of the building are 32 windows measuring 0.7×1 meter. Coverage — an impassable flat roof over metal trusses. The parameters of the fire load during mathematical modeling were taken according to the reference data of Yu.A. Koshmarov 12 types of typical fire load stored in warehouse buildings are considered. For mathematical modeling of “real” temperature fires, the “Fire Dynamics Simulator” (FDS) software package was used, which implements a field (differential) mathematical model. For mathematical modeling of the heating process of steel building structures, the finite-difference method for solving the Fourier heat equation with external and internal nonlinearity was used, implemented in the ANSYS Mechanical software package.

**Results and discussion.** The results of modeling in the FDS software package show that the temperature impact on the structure according to the standard temperature regime for fire loads: cables+wires, industrial oil, ethyl alcohol was less, which indicates an underestimation of the thermal impact on the structure. The results of modeling the heating of structures showed that the heating time of the coating truss is up to 400–700 °C for fire loads: cables+wires, industrial oil, ethyl alcohol less than the time obtained from standard tests, which indicates an initial underestimation of the actual fire resistance of steel structures of the coating when designing warehouse buildings.

**Conclusions.** The assumption that the thermal impact of the standard temperature regime on the steel structures of modern warehouse complexes was underestimated was confirmed for 3 of the 12 fire loads considered, namely: cables+wires, industrial oil, ethyl alcohol.

**Keywords:** computer simulation; FDS; ANSYS; fire load; fire temperature; fire resistance rating; required fire resistance; equivalent fire duration

**For citation:** Minailov D.A. Investigation of fire resistance of steel structures covering a warehouse building under different temperature conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):54-65. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.54-65

✉ Denis Aleksandrovich Minailov, e-mail: minailov-denis@mail.ru

## Введение

В последние десятилетия в России при строительстве складских зданий стали активно применять стальные конструкции [1], которые, обладая рядом преимуществ перед традиционными строительными материалами, имеют один существенный недостаток — быстро теряют несущую способность при воздействии высоких температур, как правило, выше 500 °C [2, 3].

Статистические данные по пожарам [4]<sup>1</sup> показывают, что за последние 9 лет систематически происходят пожары в складских зданиях. В период с 2010 по 2019 гг. количество пожаров составило 14 464, количество погибших — 259 человек, количество травмированных — 450 человек, общий ущерб — 28,9 млрд руб. Анализ произошедших за этот период пожаров показывает, что низкий предел огнестойкости несущих металлических конструкций покрытия приводит во многих случаях к его обрушению на значительной площади еще до приезда пожарных подразделений. Такая ситуа-

ция наблюдается, в основном, в зданиях II–V степеней огнестойкости, к конструкциям покрытия которых согласно требованиям Федерального закона «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 11 июля 2008 г. № 123-ФЗ либо предъявляются требования по потере несущей способности в течение 15 мин, либо такие требования отсутствуют. Именно в складских зданиях II–V степеней огнестойкости происходит подавляющее количество пожаров, сопровождающихся гибелью и травмированием людей, а также большим материальным ущербом (рис. 1)<sup>1</sup>, что указывает на низкий уровень противопожарной защиты таких зданий, связанный, в том числе и с ошибками, допущенными при проектировании.

В настоящее время соответствие конструкций требованиям Федерального закона № 123-ФЗ по огнестойкости подтверждается экспериментальными методами [2, 3] в условиях воздействия «стандартного» температурного режима по ГОСТ 30247.0–94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования».

<sup>1</sup> Федеральный банк данных «ПОЖАРЫ». URL: <http://www.vniipo.ru/institut/informatsionnye-sistemy-reestry-bazy-i-banki-danny/federalnyy-bank-dannykh-pozhary/> (дата обращения: 24.04.2020).

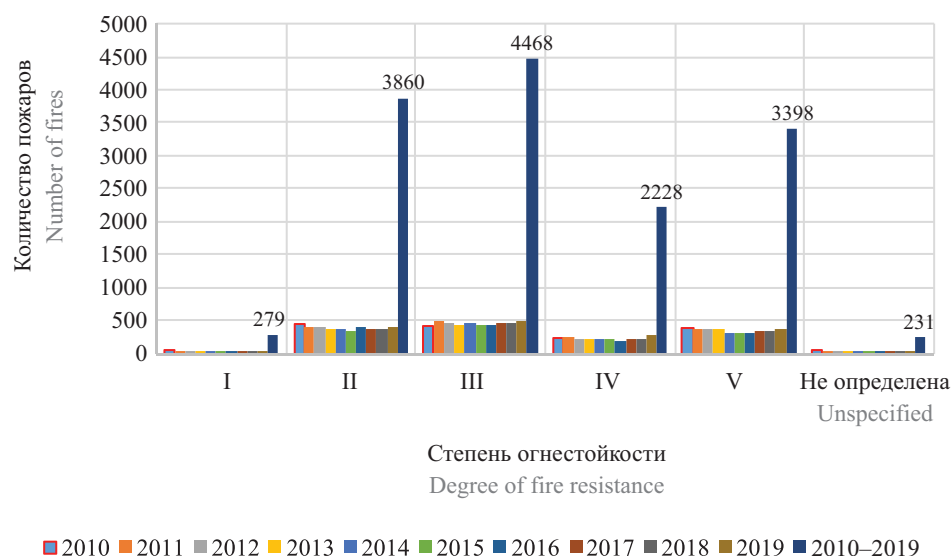


Рис. 1. Количество пожаров в складских зданиях за период с 2010 по 2019 гг.

Fig. 1. Number of fires in warehouse buildings between 2010 and 2019

«Стандартный» температурный режим является простым средством оценки огнестойкости строительных конструкций и не учитывает особенностей распространения и развития пожара в складских зданиях. Нередко в процессе проектирования и строительства крупных логистических центров (складов) с учетом технологических процессов, проходящих в них, динамика развития пожара и, следовательно, «реальные» температурные режимы могут существенно отличаться от «стандартного» [4–11]. Поэтому для подобных зданий, ввиду высокой стоимости и физической невозможности проведения натурных огневых испытаний здания или сооружений в целом, может применяться метод компьютерного моделирования развития пожара с помощью специализированных программных комплексов [12–14]. В настоящее время широко используются такие компьютерные программы, как Fire Dynamics Simulator (FDS), PHOENICS, FLUENT, SOFIE и отечественные разработки профессора С.В. Пузача [15], позволяющие решать дифференциальные уравнения (полевой метод) с учетом множества факторов, влияющих на динамику опасных факторов пожара (объемно-планировочные решения, вентиляция, автоматические установки пожаротушения (АУПТ), противодымная вентиляция, ветер, применяемые пожарными подразделениями огнетушащие вещества и др.).

#### Цели и задачи исследования

Цель исследования — оценка сходимости «стандартного» температурного режима и возможных «реальных» температурных режимов пожаров в современных складских зданиях, а также соответ-

ствия фактических пределов огнестойкости воздействию реальных пожаров.

Задачи исследования:

- провести математическое моделирование развития пожара в складском здании при различных пожарных нагрузках с оценкой температурного режима реального пожара;
- выполнить математическое моделирование прогрева несущих конструкций покрытия при «стандартном» температурном режиме и при полученных в процессе моделирования температурных режимах;
- определить эквивалентную продолжительность пожара для несущих конструкций покрытия.

#### Методы

Оценка огнестойкости стальных конструкций покрытия складских зданий производилась путем решения теплотехнической задачи прогрева в условиях нестационарного теплового воздействия при «стандартном» температурном режиме и в условиях температурного режима реального пожара. Для моделирования процесса прогрева стальных конструкций применялся конечно-разностный метод решения уравнения теплопроводности Фурье при внешней и внутренней нелинейности, реализованный в программном комплексе ANSYS mechanical. Моделирование температурных режимов реальных пожаров осуществлялось на программном комплексе Fire Dynamics Simulator (FDS), реализующем полевую математическую модель.

В качестве объекта исследования было выбрано складское здание типовой формы размерами 12×12×6,5 м (рис. 2), которые были приняты

исходя из анализа [16] объемно-планировочных решений 12 тыс. типовых зданий на стальном каркасе. Рассматриваемое складское здание входит в группу зданий площадью до 1000 м<sup>2</sup>, которые составляют около 35 % от общего количества рассмотренных зданий. В качестве несущих элементов здания использовались стальные конструкции. Покрытие — беспрогонная плоская кровля на металлических балках и фермах покрытия. В качестве несущих конструкций покрытия применены фермы из гнутосварных профилей по ГОСТ 30245–2003 «Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. Технические условия». В здании предусмотрены ворота размером 4×4 м в количестве 2 шт. и входная дверь размером 1×2 м. В стенах здания размещены 32 окна размерами 0,7×1 м.

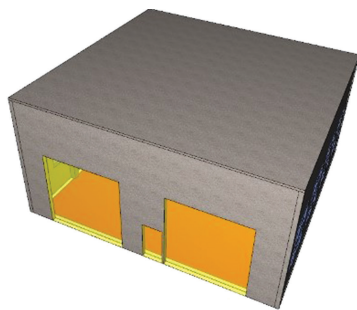


Рис. 2. Общий вид расчетной модели в программном комплексе FDS

Fig. 2. General view of the calculation model in the FDS software package

В качестве пожарной нагрузки по справочным данным [17, 18] были приняты: промтовары (текстильные изделия); резинотехнические изделия (резина и изделия из нее); склад льноволокна; склад оргстекла; этиловый спирт; кабели и провода (0,75 (АВВГ, АПВГ, ТПВ)+0,25 (КПРТ, ПР, ШРПС)); хлопок разрыхленный; склад бумаги

в рулонах; тара (древесина, картон, полистирол); радиоматериалы, индустриальное масло, склад хлопка в тюках.

Объектом, моделирующим пожарную нагрузку в программном комплексе FDS, принималось вентиляционное отверстие. Для оценки температуры на поверхности стальных конструкций верхнего пояса ферм были расставлены датчики (термопары) с шагом 1 м (рис. 3), также измерялась среднееобъемная температура на высоте 4,7...6,5 м. При проведении расчетов ворота здания были открыты, окна закрыты.

В качестве рассматриваемой конструкции покрытия была принята ферма (рис. 4).

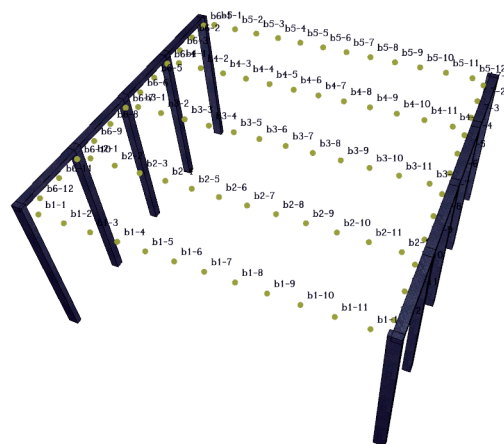


Рис. 3. Схема расстановки датчиков температуры (термопар)

Fig. 3. The arrangement of temperature sensors (thermocouples)

Конструктивные элементы металлической фермы приведены в табл. 1.

Теплотехнический расчет производился согласно [2, 19] при условии изменения температуры нагревающей среды во времени по кривой стандартного пожара по ГОСТ 30247.0–94. Уравнение кривой стандартного пожара имеет вид:

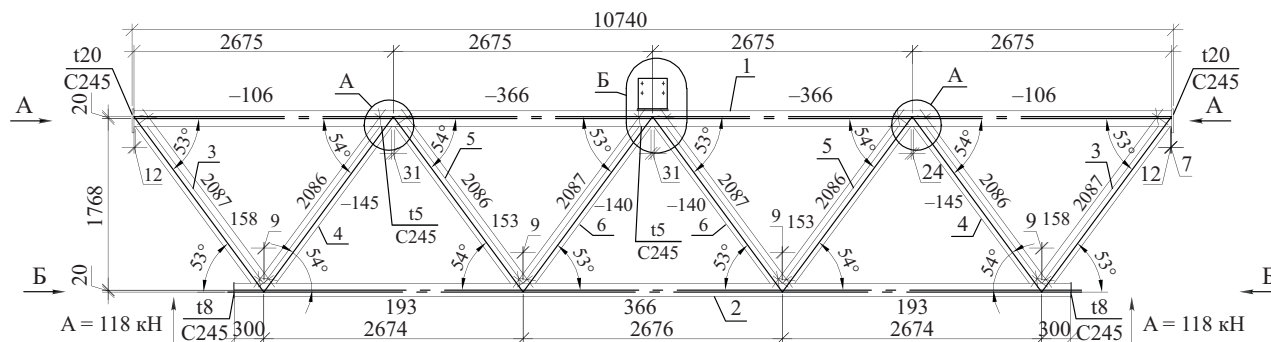


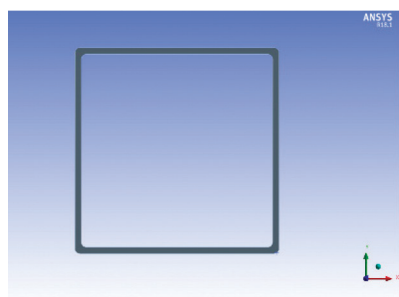
Рис. 4. Ферма покрытия

Fig. 4. Coating farm

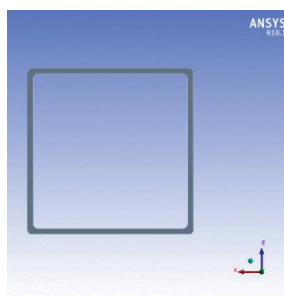
Таблица 1. Конструктивные элементы фермы

Table 1. Structural elements of the farm

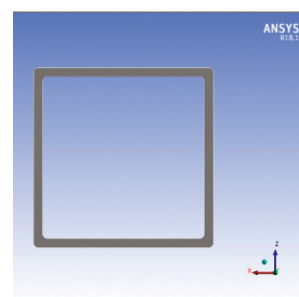
| № п/п<br>No. | Сечение<br>Section | Размеры<br>конструкции, мм<br>Construction<br>dimensions, mm | Количество<br>сторон обогрева<br>The number<br>of sides of the<br>heating | Площадь<br>поперечного<br>сечения, мм <sup>2</sup><br>Cross-sectional<br>area, mm <sup>2</sup> | Периметр<br>обогреваемой<br>поверхности, мм<br>Perimeter of the heated<br>surface, mm | Приведенная<br>толщина<br>металла, мм<br>Reduced metal<br>thickness, mm |
|--------------|--------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 1            | □                  | 160×160×5                                                    | 4                                                                         | 3100                                                                                           | 640                                                                                   | 4,84                                                                    |
| 2            | □                  | 140×140×5                                                    | 4                                                                         | 2700                                                                                           | 560                                                                                   | 4,82                                                                    |
| 3            | □                  | 100×100×5                                                    | 4                                                                         | 1900                                                                                           | 400                                                                                   | 4,75                                                                    |



□ 160×160×5,  $L = 11\,240$  мм  
□ 160×160×5,  $L = 11\,240$  мм



□ 140×140×5,  $L = 8622$  мм  
□ 140×140×5,  $L = 8622$  мм



□ 100×100×5,  $L = 2086$  мм  
□ 100×100×5,  $L = 2086$  мм

Рис. 5. Модели элементов фермы покрытия в программном комплексе ANSYS mechanical

Fig. 5. Models of coating farm elements in the “ANSYS mechanical” software package

$$t_{b,\tau} = 345 \lg(0,133\tau + 1) + t_n, \quad (1)$$

где  $t_{b,\tau}$  — температура нагревающей среды, К;

$\tau$  — время, с;

$t_n$  — начальная температура нагревающей среды, К.

Коэффициент теплопередачи  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>град), от нагревающей среды с температурой  $t_{b,\tau}$  поверхности с температурой  $t_0$  вычисляется по формуле (2):

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l = 29 + 5,77s_{np} \frac{\left(\frac{T_b}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_0}{100}\right)^4}{T_b - T_0}, \quad (2)$$

где  $\alpha_k$  — конвективная составляющая;

$\alpha_l$  — лучистая составляющая;

$s_{np}$  — приведенная степень черноты: «нагревающая среда — поверхность конструкции».

В формуле (2) значение приведенной степени черноты:

$$s_{np} = \frac{1}{\frac{1}{s} + \frac{1}{s_0} - 1}, \quad (3)$$

где  $s$  — степень черноты огневой камеры печи,  $s = 0,85$ ;

$s_0$  — степень черноты обогреваемой поверхности конструкции, для незащищенных стальных конструкций  $s_0 = 0,74$ .

Для теплотехнического расчета в программном комплексе ANSYS mechanical были построены модели элементов фермы (рис. 5).

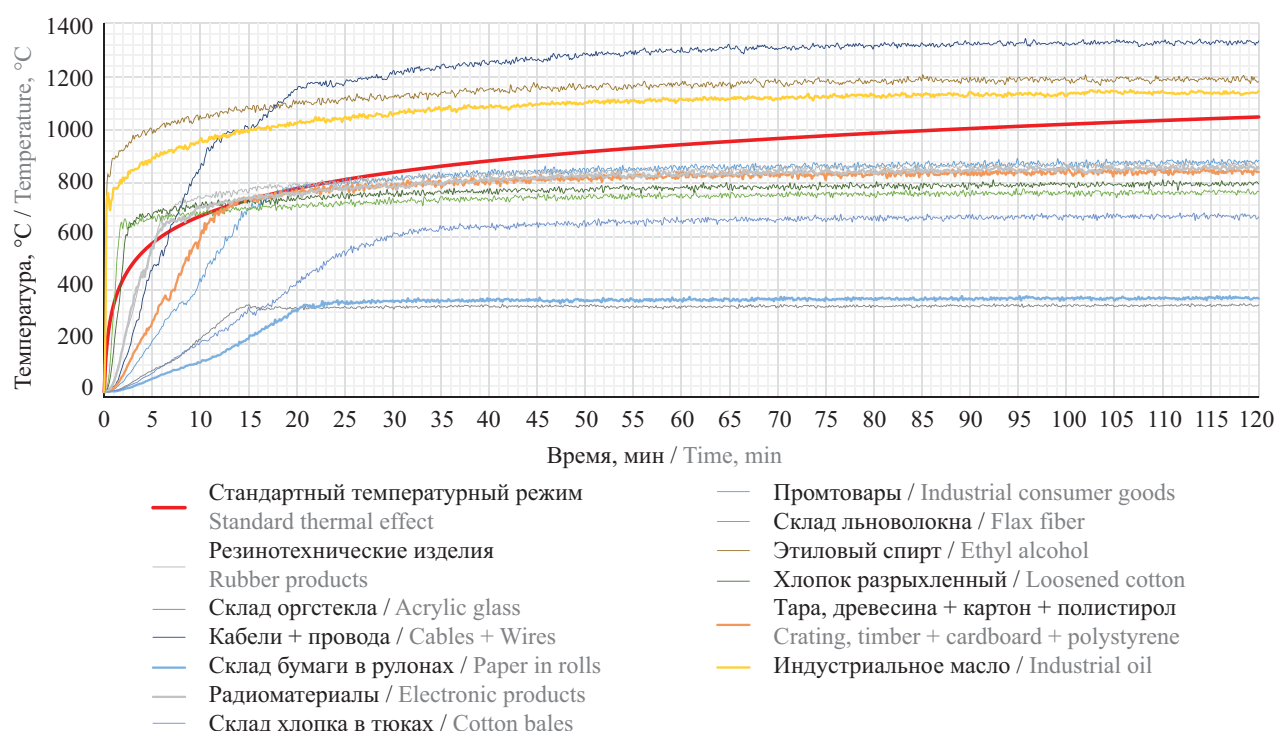
## Результаты и обсуждение

Результаты численного моделирования температурного режима пожара в помещении складского здания представлены на рис. 6.

Полученные при моделировании температурные режимы таких пожарных нагрузок, как кабели и провода, индустриальное масло, этиловый спирт, были выше максимальных значений температур «стандартного» температурного режима. Однако значения максимальных температур, определенные по результатам численных экспериментов для остальных пожарных нагрузок, приведенных выше, оказались ниже, чем при «стандартном» температурном режиме.

Результаты теплотехнических расчетов приведены в табл. 2 и на рис. 7.





**Рис. 6.** Результаты численного моделирования «стандартного» температурного режима при среднеобъемной температуре на высоте 4,7...6,5 м

**Fig. 6.** Standard temperature regime and average volume temperature at an altitude of 4.7–6.5 m

**Таблица 2.** Результаты теплотехнического расчета

**Table 2.** The results of the heat engineering calculation

| Размеры конструкции<br>Construction dimensions | Температура прогрева, °C<br>Temperature, °C | Время прогрева конструкции, мин<br>Heating time of the structure, min |      |     |     |   |     |     |     |   |      |      |     |      |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------|-----|-----|---|-----|-----|-----|---|------|------|-----|------|
|                                                |                                             | 1                                                                     | 2    | 3   | 4   | 5 | 6   | 7   | 8   | 9 | 10   | 11   | 12  | 13   |
| □ 160×160×5                                    | 400                                         | 6,6                                                                   | 13,6 | 7,2 | 4,6 | — | 1,7 | 8,2 | 5,0 | — | 11,1 | 7,4  | 2,3 | 24,1 |
| □ 140×140×5                                    |                                             | 6,6                                                                   | 13,6 | 7,2 | 4,6 | — | 1,7 | 8,2 | 5,0 | — | 11,1 | 7,4  | 2,3 | 24,1 |
| □ 100×100×5                                    |                                             | 6,5                                                                   | 13,5 | 7,1 | 4,5 | — | 1,7 | 8,1 | 4,9 | — | 11,0 | 7,3  | 2,2 | 24,0 |
| □ 160×160×5                                    | 450                                         | 7,4                                                                   | 14,3 | 7,7 | 5,2 | — | 1,9 | 8,6 | 5,6 | — | 11,7 | 8,1  | 2,6 | 25,8 |
| □ 140×140×5                                    |                                             | 7,4                                                                   | 14,3 | 7,7 | 5,2 | — | 1,9 | 8,6 | 5,6 | — | 11,7 | 8,1  | 2,6 | 25,8 |
| □ 100×100×5                                    |                                             | 7,4                                                                   | 14,3 | 7,7 | 5,2 | — | 1,9 | 8,6 | 5,5 | — | 11,7 | 8,0  | 2,5 | 25,7 |
| □ 160×160×5                                    | 500                                         | 8,4                                                                   | 15,0 | 8,2 | 6,0 | — | 2,2 | 9,0 | 6,2 | — | 12,4 | 8,9  | 2,9 | 27,9 |
| □ 140×140×5                                    |                                             | 8,4                                                                   | 15,0 | 8,2 | 6,0 | — | 2,1 | 9,0 | 6,2 | — | 12,4 | 8,9  | 2,9 | 27,8 |
| □ 100×100×5                                    |                                             | 8,3                                                                   | 15,0 | 8,2 | 6,0 | — | 2,1 | 9,0 | 6,2 | — | 12,4 | 8,8  | 2,9 | 27,7 |
| □ 160×160×5                                    | 550                                         | 9,5                                                                   | 15,8 | 8,9 | 7,0 | — | 2,4 | 9,5 | 7,1 | — | 13,2 | 9,8  | 3,3 | 30,3 |
| □ 140×140×5                                    |                                             | 9,5                                                                   | 15,8 | 8,9 | 7,0 | — | 2,4 | 9,5 | 7,1 | — | 13,2 | 9,8  | 3,2 | 30,3 |
| □ 100×100×5                                    |                                             | 9,5                                                                   | 15,7 | 8,9 | 6,9 | — | 2,4 | 9,4 | 7,0 | — | 13,1 | 9,7  | 3,2 | 30,2 |
| □ 160×160×5                                    | 600                                         | 10,9                                                                  | 16,7 | 9,7 | 8,4 | — | 2,7 | 9,9 | 8,1 | — | 14,1 | 10,8 | 3,7 | 34,0 |
| □ 140×140×5                                    |                                             | 10,9                                                                  | 16,7 | 9,7 | 8,3 | — | 2,7 | 9,9 | 8,1 | — | 14,1 | 10,8 | 3,6 | 34,0 |
| □ 100×100×5                                    |                                             | 10,8                                                                  | 16,7 | 9,7 | 8,2 | — | 2,6 | 9,9 | 8,1 | — | 14,0 | 10,7 | 3,6 | 33,9 |

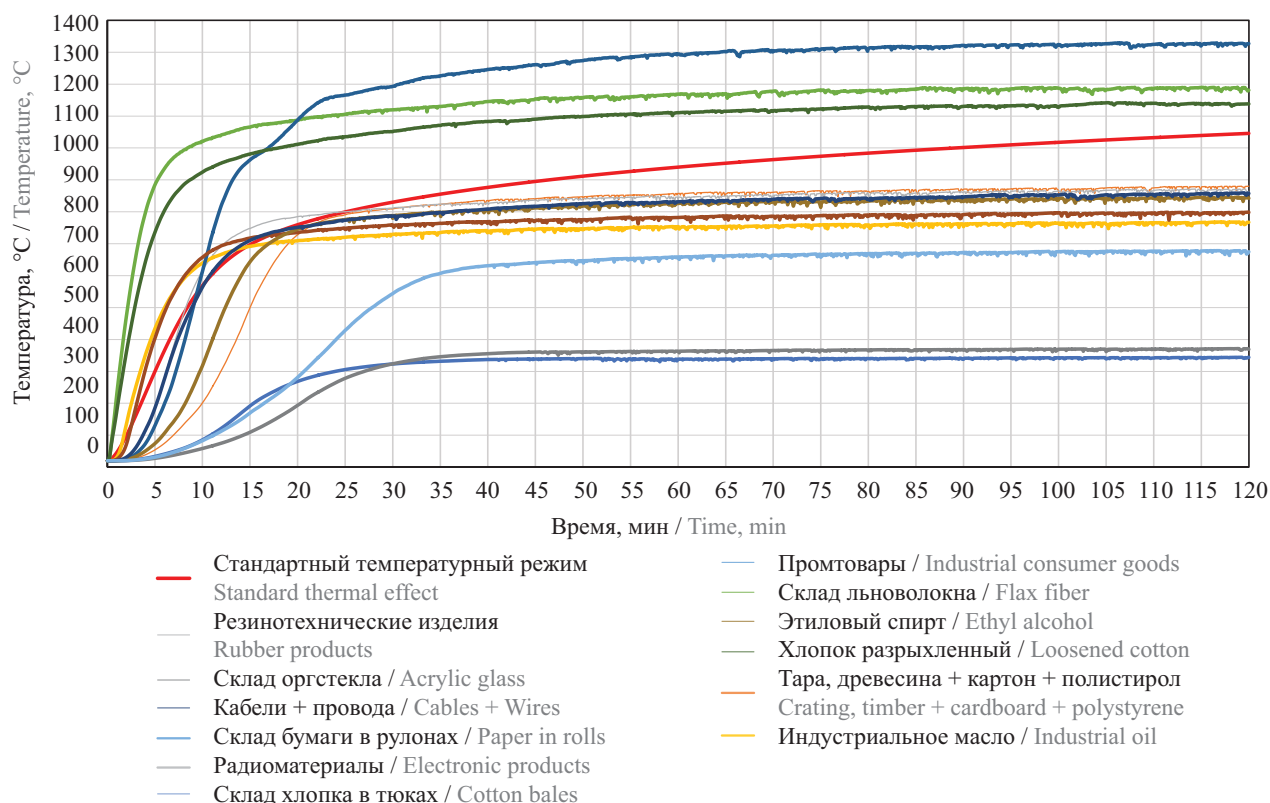
| Размеры конструкции<br>Construction dimensions | Температура прогрева, °C<br>Temperature, °C | Время прогрева конструкции, мин<br>Heating time of the structure, min |      |      |      |   |     |      |      |   |      |      |     |      |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------|------|------|---|-----|------|------|---|------|------|-----|------|
|                                                |                                             | 1                                                                     | 2    | 3    | 4    | 5 | 6   | 7    | 8    | 9 | 10   | 11   | 12  | 13   |
| □ 160×160×5                                    | 650                                         | 12,7                                                                  | 17,7 | 10,7 | 10,7 | — | 3,0 | 10,3 | 9,7  | — | 15,2 | 12,2 | 4,1 | 52,0 |
| □ 140×140×5                                    |                                             | 12,7                                                                  | 17,7 | 10,7 | 10,6 | — | 3,0 | 10,3 | 9,7  | — | 15,2 | 12,2 | 4,1 | 52,0 |
| □ 100×100×5                                    |                                             | 12,6                                                                  | 17,7 | 10,7 | 10,5 | — | 2,9 | 10,3 | 9,6  | — | 15,1 | 12,1 | 4,0 | 52,0 |
| □ 160×160×5                                    | 700                                         | 15,2                                                                  | 19,0 | 12,3 | 16,7 | — | 3,3 | 10,8 | 12,6 | — | 17,0 | 14,4 | 4,6 | —    |
| □ 140×140×5                                    |                                             | 15,2                                                                  | 19,0 | 12,2 | 16,7 | — | 3,3 | 10,8 | 12,6 | — | 17,0 | 14,3 | 4,6 | —    |
| □ 100×100×5                                    |                                             | 15,1                                                                  | 19,0 | 12,2 | 16,7 | — | 3,2 | 10,8 | 12,5 | — | 16,9 | 14,3 | 4,5 | —    |

Примечания. \* Позиции режимов и пожарных нагрузок: 1 — «стандартный» температурный режим; 2 — промтовары; 3 — резинотехнические изделия; 4 — склад льноволокна; 5 — склад оргстекла; 6 — этиловый спирт; 7 — кабели и провода; 8 — хлопок разрыхленный; 9 — склад бумаги в рулонах; 10 — тара (древесина и картон); 11 — радиоматериалы; 12 — промышленное масло; 13 — склад хлопка в тюках.

\*\* Знак «—» в таблице означает, что указанная в таблице температура за время расчета не достигнута.

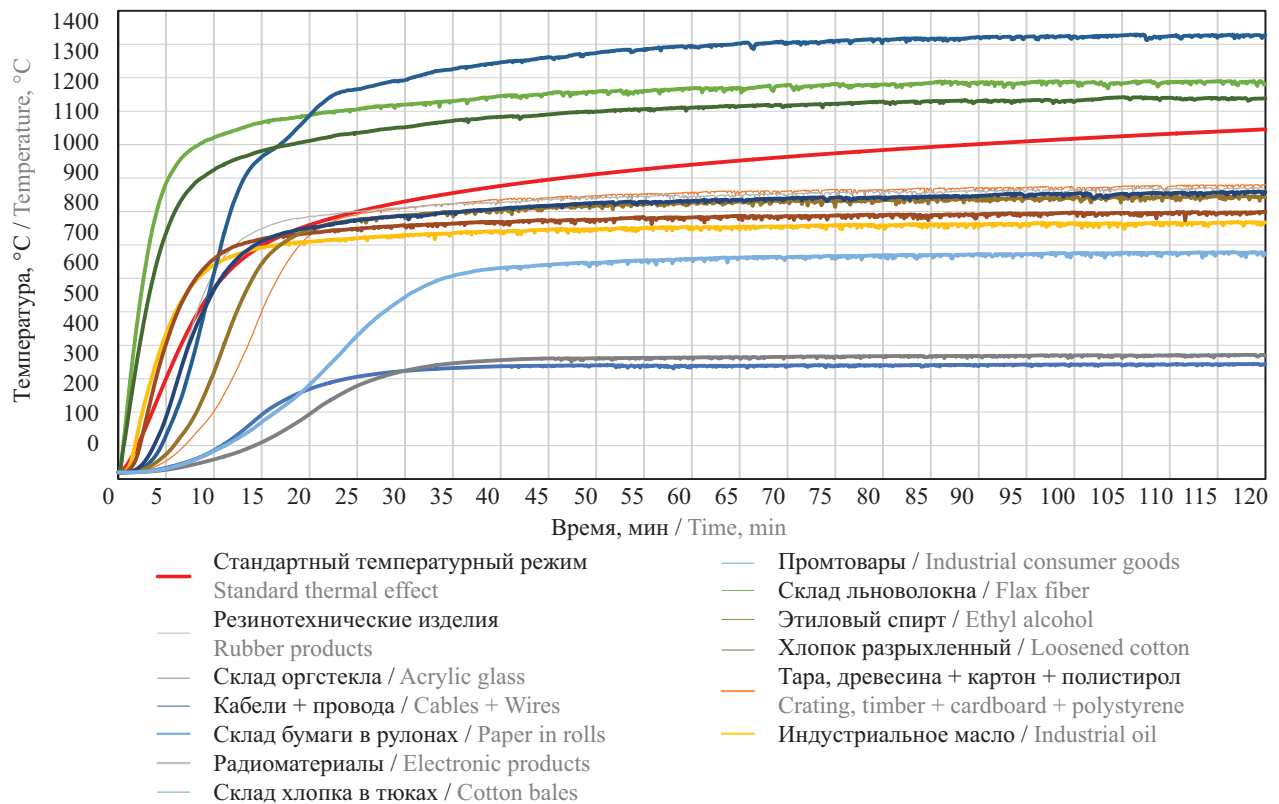
Note. \* Items in the table: 1 — Standard temperature conditions; 2 — industrial Goods; 3 — Rubber products; 4 — flax fiber Warehouse; 5 — plexiglass Warehouse; 6 — Ethyl alcohol; 7 — Cables+wires; 8 — loosened Cotton; 9 — paper Warehouse in rolls; 10 — packaging (wood+cardboard); 11 — radio materials; 12 — Industrial oil; 13 — cotton Warehouse in bales.

\*\* The “—” sign in the table means that the specified temperature in the table does not occur during the calculation.

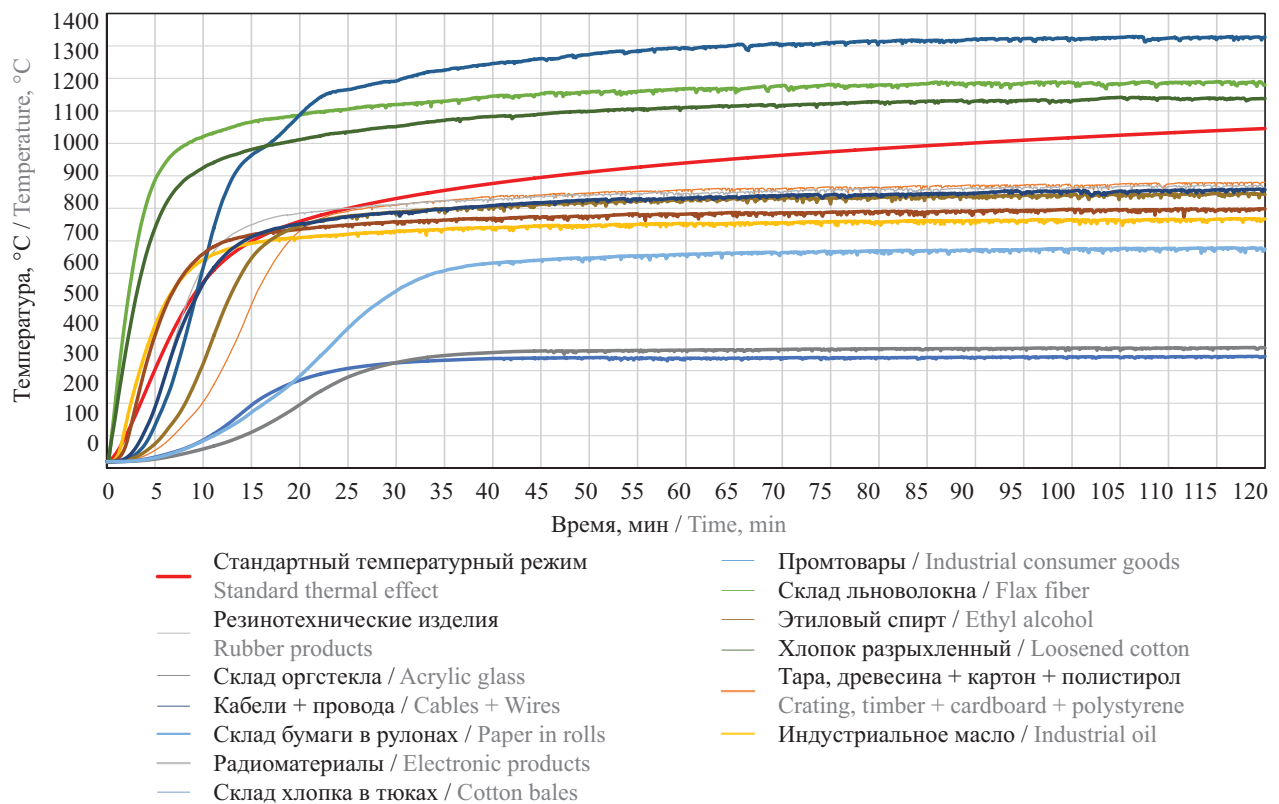


a

Рис. 7. Кривые прогрева прямоугольных труб размером 160×160×5 мм (а) в условиях различного теплового воздействия  
Fig. 7. Heating curves of a rectangular pipes with a size of 160×160×5 mm (a) under different temperature conditions



б



в

**Рис. 7.** Кривые прогрева прямоугольных труб размером 140×140×5 мм (б) и 100×100×5 мм (в) в условиях различного теплового воздействия

**Fig. 7.** Heating curves of a rectangular pipes with a size of 140×140×5 mm (b) and 100×100×5 mm (c) under different temperature conditions



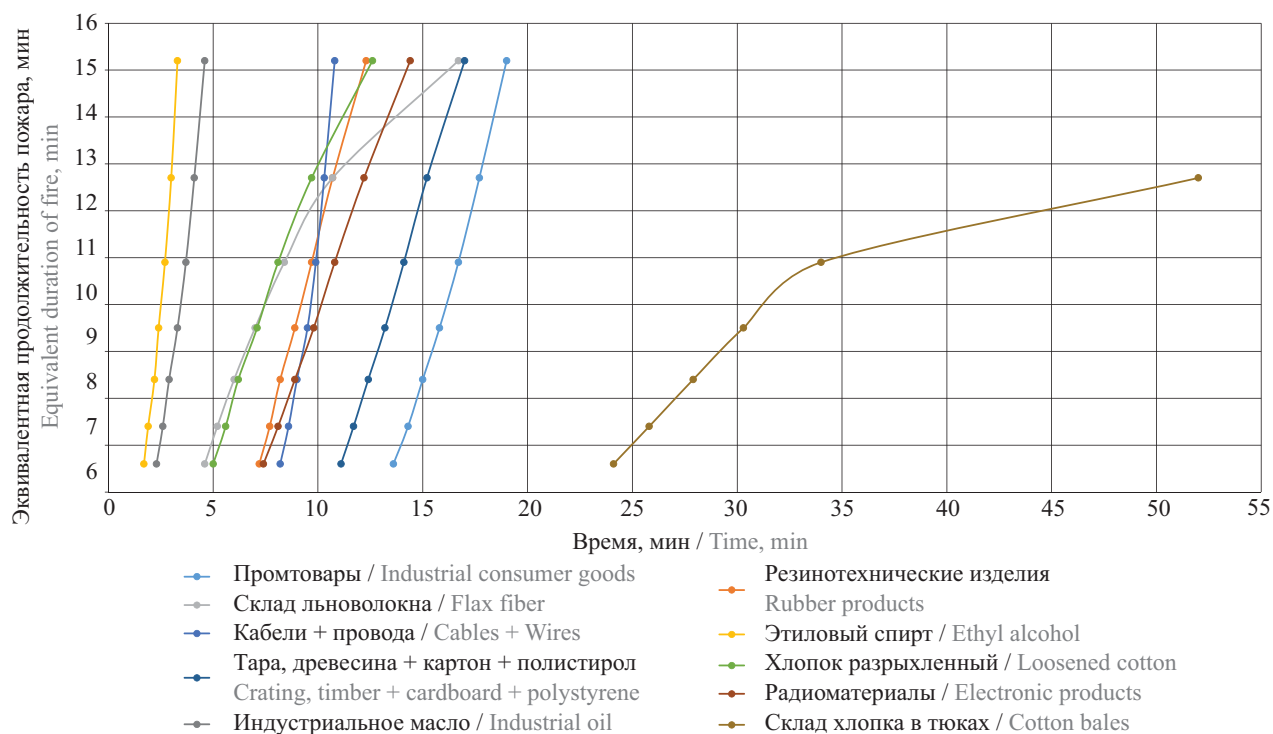


Рис. 8. Зависимость эквивалентной продолжительности пожара от вида пожарной нагрузки

Fig. 8. Dependence of the equivalent duration of the fire on the type of fire load

Результаты численных экспериментов показывают, что время прогрева конструкций фермы до 400...700 °С для рассматриваемых пожарных нагрузок существенно различается и в некоторых случаях ниже, чем при «стандартном» температурном режиме. На рис. 8 показаны зависимости эквивалентной продолжительности пожара от пожарной нагрузки.

Из рис. 8 видно, что эквивалентная продолжительность пожара для таких нагрузок, как склад льноволокна, этиловый спирт, хлопок разрыхленный, индустриальное масло, резинотехнические изделия, выше продолжительности реального пожара, что указывает на недооценку теплового воздействия реальных пожаров на стальные конструкции покрытия складских зданий в расчетах для «стандартного» температурного режима. Потеря несущей способности фермы покрытия при наиболее критичном «реальном» температурном режиме пожара, полученном по результатам моделирования, наступает на 2-й и 4-й минутах, для «стандартного» температурного режима — на 6-й и 15-й минутах для критических температур 400 и 700 °С соответственно. Приведенные результаты численных экспериментов показали, что применение показателей одного «стандартного» температурного режима при проектировании складских зданий приводит к изначальному занижению фактических пределов огнестойкости несущих конструкций покрытия.

Полученные выше результаты оценки эквивалентной продолжительности пожара могут быть применены при определении требуемых пределов огнестойкости стальных конструкций покрытия складских зданий, которые могут быть рассчитаны по формуле (4) [20, 21]:

$$P_{tr} = K_0 t_{эkv}, \quad (4)$$

где  $P_{tr}$  — требуемый предел огнестойкости;  
 $K_0$  — коэффициент огнестойкости;  
 $t_{эkv}$  — эквивалентная продолжительность пожара.

Согласно требованиям п. 5.4.3 СП 2.13130.2012, допускается применять незащищенные стальные конструкции покрытия независимо от их фактического предела огнестойкости, за исключением случаев, когда предел огнестойкости хотя бы одного из элементов несущих конструкций покрытия по результатам испытаний составляет менее R8. Из приведенных выше расчетов следует, что в случае применения «стандартного» температурного режима для рассматриваемой фермы покрытия при критической температуре 500 °С и выше требования п. 5.4.3 СП 2.13130.2012 соблюдаются, и огнезащитная обработка конструкции не требуется. В случае же оценки огнестойкости по полученному в результате моделирования наиболее критичному «реальному» температурному режиму пожара дан-

ное требование не соблюдается, и требуется огнезащитная обработка. При этом следует отметить, что разработка мероприятий по огнезащите стальных конструкций с применением вспучивающихся покрытий в условиях воздействия реальных пожаров связана с определенными трудностями, так как их огнезащитная эффективность зависит от температурного режима [21, 22].

### Заключение

Анализ пожаров, произошедших в складских зданиях с 2010 по 2019 гг., показал, что во многих зданиях II–V степеней огнестойкости еще до приезда пожарных подразделений происходит обрушение покрытия на значительной площади, а сами пожары сопровождаются гибелью и травмированием людей, значительным материальным ущербом. Такая ситуация сложилась из-за низкой огнестойкости несущих стальных конструкций покрытия, которые, согласно нормативным требованиям, допускается применять без огнезащиты в случае, если к ним применяются требования по огнестойкости в течение 15 мин и собственный предел огнестойкости конструкции составляет не менее 8 мин.

В ходе проведения численных экспериментов в программном комплексе FDS установлено, что

тепловое воздействие, оказываемое на несущие конструкции покрытия при «стандартном» температурном режиме, для трех (кабели и провода, индустриальное масло, этиловый спирт) из 12 рассмотренных пожарных нагрузок оказалось ниже, что указывает на недооценку теплового воздействия.

Результаты моделирования прогрева конструкций в программном комплексе ANSYS mechanical показали, что время прогрева фермы покрытия до 400...700 °C для указанных пожарных нагрузок оказалось меньше времени, полученного по результатам прогрева при «стандартном» температурном режиме, что указывает на изначальное занижение фактической огнестойкости стальных конструкций покрытия при проектировании складских зданий.

Из полученных результатов исследования можно сделать вывод о том, что проводимая при проектировании оценка соответствия пределов огнестойкости конструкций покрытия значениям, требуемым Федеральным законом № 123-ФЗ, при «стандартном» температурном режиме без учета особенности пожарной нагрузки в ряде случаев приводит к недооценке теплового воздействия и занижению фактической огнестойкости, что отрицательно сказывается на пожарной безопасности складских зданий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якубсон В.М. Перспективы металла как строительного материала // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 2 (54). С. 4–5. DOI: 10.5862/MCE.54.1
2. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 143 с.
3. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. М. : Пожнаука, 2001. 382 с.
4. Еремина Т.Ю., Минайлов Д.А. Гармонизация российских и международных нормативных документов по оценке огнестойкости строительных конструкций (основные подходы к проведению огневых испытаний) // Пожарная безопасность. 2014. № 2. С. 151–155.
5. Roitman V.M. Consideration of real fire condition while calculating the fire resistance of building structures on the basis of the kinetic approach // Fire Safety Journal. 1990. Vol. 16. Pp. 433–442.
6. Phan L.T., McAllister T.P., Gross J.L., Hurley M.J. Best practice guidelines for structural fire resistance design of concrete and steel buildings. NIST Technical Note 1681. Gaithersburg, Maryland : NIST, 2010. 200 p. DOI: 10.6028/nist.tn.1681
7. Garlock M., Kruppa J., Li G.-Q., Zhao B. White paper on fire behavior of steel structures. NIST GCR 15-984. Gaithersburg, Maryland : NIST, 2014. 20 p. DOI: 10.6028/nist.gcr.15-984
8. Kotsovinos P. Analysis of the structural response of tall buildings under multifloor and travelling fires. Edinburgh : The University of Edinburgh, 2013. 240 p.
9. Kowalski R. The use of Eurocode model of reinforcing steel behavior at high temperature for calculation of bars elongation in RC elements subjected to fire // Procedia Engineering. 2017. Vol. 193. Pp. 27–34. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.182
10. Razdolsky L. Structural fire loads: theory and principles. New York : McGraw-Hill Education, 2012. 448 p.
11. Du Y. A new temperature-time curve for fire-resistance analysis of structures // Fire Safety Journal. 2012. Vol. 54. Pp. 113–120. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.07.004
12. Mouritz A.P., Feih S., Kandare E., Gibson A.G. Thermal-mechanical modelling of laminates with fire protection coating // Composites Part B: Engineering. 2013. Vol. 48. Pp. 68–78. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.12.001
13. Outinen J., Samec J., Sokol Z. Research on fire protection methods and a case study «Futurum» // Procedia Engineering. 2012. Vol. 40. Pp. 339–344. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.105

14. Гогоберидзе Н.В., Благородова Н.В. К вопросу автоматизации системы определения предела огнестойкости строительных конструкций // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4–1 (22). С. 110.
15. Пузач С.В. Математическое моделирование газодинамики и тепломассообмена при решении задач пожаровзрывобезопасности. М. : Академия ГПС МЧС России, 2002. 149 с.
16. Фисун В.А. Номенклатура базовых зданий комплектной поставки из легких металлических конструкций : монография. М. : МИИТ, 2009. 143 с.
17. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учеб. пособие. М. : Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.
18. Абашкин А.А., Карпов А.В., Ушаков Д.В., Фомин М.В., Гилетич А.Н., Комков П.М., Самошин Д.А. Пособие по применению «Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности». М. : ВНИИПО, 2014. 226 с.
19. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотилов А.В. Инженерный метод расчета огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой из минераловатных плит «ROCKWOOL CONLIT» // Пожарная безопасность. 2006. № 4. С. 78–85.
20. Иванов В.Н. Комплексный подход к определению требуемых пределов огнестойкости высотных жилых зданий // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2018. № 1. С. 28–38. DOI: 10.25257/FE.2018.1.28-38.
21. Korolchenko D., Eremina T., Minailov D. New method for quality control of fire protective coatings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 471. Issue 11. DOI: 10.1088/1757-899X/471/11/112016
22. 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. Pp. 42–50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004

## REFERENCES

1. Yakubson V.M. Prospects of metal as a construction material. *Magazine of Civil Engineering*. 2015; 2(54):4-5. DOI: 10.5862/MCE.54.1 (rus.).
2. Yakovlev A.I. *Calculation of fire resistance of building structures*. Moscow, Stroyizdat, 1988; 143. (rus.).
3. Roitman V.M. Engineering decision of fire resistance projected and reconstructed buildings. Moscow, Pozhnauka, 2001; 382. (rus.).
4. Eremina T.Y., Minaylov D.A. Harmonization of the Russian and international normative documents on assessment of fire resistance of structures (key approaches to carrying out fire tests). *Fire Safety*. 2014; 2:151-155. (rus.).
5. Roitman V.M. Consideration of real fire condition while calculating the fire resistance of building structures on the basis of the kinetic approach. *Fire Safety Journal*. 1990; 16:433-442.
6. Phan L.T., McAllister T.P., Gross J.L., Hurley M.J. *Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings*. NIST Technical Note 1681. Gaithersburg, Maryland, NIST, 2010; 200. DOI: 10.6028/nist.tn.1681
7. Garlock M., Kruppa J., Li G.-Q., Zhao B. *White Paper on Fire Behavior of Steel Structures*. NIST GCR 15-984. Gaithersburg, Maryland, NIST, 2014; 20. DOI: 10.6028/nist.gcr.15-984
8. Kotsovinos P. *Analysis of the structural response of tall buildings under multifloor and travelling fires*. Edinburgh, The University of Edinburgh, 2013; 240.
9. Kowalski R. The use of Eurocode model of reinforcing steel behavior at high temperature for calculation of bars elongation in RC elements subjected to fire. *Procedia Engineering*. 2017; 193:27-34. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.182
10. Razdolsky L. *Structural Fire Loads: Theory and Principles*. New York, McGraw-Hill Education, 2012; 448.
11. Du Y. A new temperature-time curve for fire-resistance analysis of structures. *Fire Safety Journal*. 2012; 54:113-120. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.07.004
12. Mouritz A.P., Feih S., Kandare E., Gibson A.G. Thermal-mechanical modelling of laminates with fire protection coating. *Composites Part B: Engineering*. 2013; 48:68-78. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.12.001
13. Outinen J., Samec J., Sokol Z. Research on fire protection methods and a case study “Futurum”. *Procedia Engineering*. 2012; 40:339-344. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.105
14. Gogoberidze N.V., Blagorodova N.V. On the automation system for determining the fire resistance of building structures. *Engineering Journal of Don*. 2012; 4-1(22):110. (rus.).
15. Puzach S.V. *Mathematical modeling of gas dynamics and heat and mass transfer in solving fire and explosion safety problems*. Moscow, Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2002; 149. (rus.).
16. Fisun V.A. *Nomenclature of base buildings of complete delivery of light metal structures : monograph*. Moscow, MIIT, 2009; 143. (rus.).

17. Koshmarov Y.A. *Predicting indoor fire hazards: a training manual*. Moscow, Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2000; 118. (rus.).
18. Abashkin A.A., Karpov A.V., Ushakov D.V., Fomin M.V., Giletich A.N., Komkov P.M., Samoshin D.A. *Manual on the application of "Methods for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and structures of various classes of functional fire hazard"*. Moscow, VNIPO, 2014; 226. (rus.).
19. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Engineering method of design of fire resistance of steel constructions protected by "ROCKWOOL CONLIT" mineral wool boards. *Fire Safety*. 2006; 4:78-85. (rus.).
20. Ivanov V.N. Complex approach to determining required fire-resistance of high-rise residential buildings. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2018; 1:28-38. DOI: 10.25257/FE.2018.1.28-38 (rus.).
21. Korolchenko D., Eremina T., Minailov D. New method for quality control of fire protective coatings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 471(11). DOI: 10.1088/1757-899X/471/11/112016
22. 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; 95:42-50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004

Поступила 10.03.2020, после доработки 27.04.2020;

принята к публикации 07.05.2020

Received March 10, 2020; Received in revised form April 27, 2020;

Accepted May 7, 2020

### Информация об авторе

**МИНАЙЛОВ Денис Александрович**, заместитель начальника, Судебно-экспертное учреждение Федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по Калининградской области, г. Калининград, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-9811-3908; ResearcherID: AAI-2064-2020; Scopus Author ID: 57207307581; e-mail: minailov-denis@mail.ru

### Information about the author

**Denis A. MINAILOV**, Deputy Chief, Forensic Institutions Federal Fire Service "Fire testing laboratory" of Kaliningrad Region, Kaliningrad, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9811-3908; ResearcherID: AAI-2064-2020; Scopus Author ID: 57207307581; e-mail: minailov-denis@mail.ru