

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 6. С. 61–72
 POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021; 30(6):61-72

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.014:699.812+614.84

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.06.61-72>

Определение фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с учетом реальной пожарной нагрузки

Сергей Викторович Пузач, Татьяна Юрьевна Еремина,
 Дмитрий Александрович Корольченко ✉

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

Аннотация

Введение. Пределы огнестойкости несущих и ограждающих строительных конструкций могут быть определены с помощью метода расчета тепломассообмена при пожаре. Применение метода осложняется многофакторностью и нелинейностью задачи. При необходимости может быть создан температурный режим, учитывающий реальные условия пожара. В данной работе проведены расчеты фактических пределов огнестойкости металлических конструкций теплоэлектростанции.

Цели и задачи. Определение фактических пределов огнестойкости несущих металлических конструкций при наиболее опасном сценарии развития реального пожара.

Методы исследования. С учетом сложности объемно-планировочных решений здания выбран полевой метод расчета, который может быть применен для помещений сложной геометрической конфигурации, в которых один из геометрических размеров гораздо больше остальных. Решаются нестационарные трехмерные дифференциальные уравнения законов сохранения массы, импульса и энергии для газовой среды помещения (уравнения Навье – Стокса в форме Рейнольдса), а также для компонентов газовой среды и оптической плотности дыма. Для определения распределения температур внутри строительной конструкции в одномерном случае решается уравнение теплопроводности. Пределом огнестойкости строительной конструкции считается момент времени от начала пожара, когда температура хотя бы в одном месте конструкции достигает критического значения.

Результаты и обсуждение. Результаты расчетов показали, что при наиболее опасном сценарии развития пожара максимальные температуры несущих металлических конструкций в течение 15 мин от начала пожара существенно меньше критической температуры 500 °С.

Выводы. Огнезащита несущих металлических конструкций, расположенных в машинном отделении с паровыми турбинами, не требуется.

Ключевые слова: опасные факторы пожара; полевая модель; динамика развития пожара; сценарии развития пожара; несущие металлические конструкции

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект #FSWG-2020-0007).

Для цитирования: Пузач С.В., Еремина Т.Ю., Корольченко Д.А. Определение фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с учетом реальной пожарной нагрузки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 6. С. 61–72. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.61-72

✉ Корольченко Дмитрий Александрович, e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

The evaluation of actual fire resistance limits of steel structures exposed to real fire loading

Sergey V. Puzach, Tatyana Yu. Eremina, Dmitriy A. Korolchenko ✉

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The fire resistance limits of load-bearing and enclosing structures can be identified using the method of heat-and-mass transfer calculation in case of fire. The multifactorial nature and nonlinearity of the problem makes the application of this method complicated. If necessary, the temperature regime, demonstrating the conditions of real fire, can be applied. In this work, actual fire resistance limits of metal structures of a thermal power station are calculated.

Goals and objectives. The co-authors attempt to identify the actual fire resistance limits of bearing metal structures in case of the most dangerous fire development scenario.

Methods. Taking into account the complexity of space-planning solutions of a building, the field-focused calculation method was selected. This method is applicable to premises, featuring complex geometric shape, where one geometric dimension is much larger than the others. Non-stationary three-dimensional differential equations of mass, momentum and energy conservation are solved for the gas medium inside a room (the Reynolds type of Navier–Stokes equations), as well as the components of the gas medium and the optical density of smoke. A heat transfer equation is solved to determine the temperature distribution inside the building structure for a one-dimensional case. The fire resistance limit of the building structure is identified as the moment in time following the start of fire, when the temperature in, at least, one point of the structure reaches a critical value.

Results and discussion. Calculation results show that in case of the most dangerous fire development scenario, within 15 minutes as of the start of fire, maximum temperatures of load-bearing metal structures are far below the critical temperature of 500 °C.

Conclusions. Load-bearing metal structures in an engine room, that has steam turbines, don't need fire protection.

Keywords: dangerous fire factors; field model; fire development dynamics; fire development scenarios; bearing metal structures

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project: Theoretical and experimental design of new composite materials to ensure safety during the operation of buildings and structures under conditions of technogenic and biogenic threats #FSWG-2020-0007).

For citation: Puzach S.V., Eremina T.Yu., Korolchenko D.A. The evaluation of actual fire resistance limits of steel structures exposed to real fire loading. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(6):61-72. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.61-72 (rus).

✉ Dmitriy Aleksandrovich Korolchenko, e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

Введение

При анализе пожарной опасности в соответствии с нормативными документами могут использоваться расчетные сценарии, основанные на соотношении временных параметров развития и распространения опасных факторов пожара и позволяющие определить риск для людей и конструкций объектов и выбрать наиболее эффективные системы противопожарной защиты.

В соответствии с п. 2 ст. 35 Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»¹ наступление пределов огнестойкости несущих и ограждающих строительных конструкций можно определять в результате расчетов. Поэтому при определении огнестойкости строительных конструкций вопрос точности и надежности метода расчета тепломассообмена при пожаре является ключевым. Сложность реализации такого метода заключается в многофакторности и нелинейности задачи.

Также в соответствии с п. 6.1 ГОСТ 30247.0–94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования»², при необхо-

димости может быть создан температурный режим, учитывающий реальные условия пожара.

В данной работе проведены расчеты фактических пределов огнестойкости металлических конструкций, находящихся в ТЭЦ.

При расчете реального пожара используется нормативный полевой метод расчета динамики опасных факторов пожара, описанный в Методике определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности (приложение к приказу МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382) (далее — Методика)³ и Изменениях, вносимых в методику определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности⁴. Нормативный полевой метод расчета динамики опасных факторов пожара основан на работах [1–3] и реализован в программах расчета на ЭВМ, имеющих свидетельства об официальной регистрации программы в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам [4, 5].

Цель работы — определить фактические пределы огнестойкости несущих металлических кон-

¹ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ : принят Государственной Думой 4 июля 2008 г. ; одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 г.

² ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования : принят Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации и техническому нормированию в строительстве (МНТКС) 17 ноября 1994 г.

³ Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : утверждена приказом МЧС России от 30 июня 2009 года № 382.

⁴ Изменения, вносимые в методику определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности (приложение к приказу МЧС России от 12 декабря 2011 г. № 749) : утверждена приказом МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382.

струкций при наиболее опасном сценарии развития реального пожара.

Методология расчета

Выбор конкретной модели расчета динамики развития пожара в соответствии с Методикой следует осуществлять исходя из следующих предположений:

интегральный метод:

- для зданий, содержащих развитую систему помещений малого объема простой геометрической конфигурации;
- для помещений, где характерный размер очага пожара соизмерим с характерными размерами помещения и размеры помещения соизмеримы между собой (линейные размеры помещения отличаются не более чем в 5 раз);

зонный (зональный) метод:

- для предварительных расчетов с целью выявления наиболее опасного сценария пожара;
- для помещений и систем помещений простой геометрической конфигурации, линейные размеры которых соизмеримы между собой (линейные размеры помещения отличаются не более чем в 5 раз).

В отличие от интегральных моделей зональный метод может использоваться:

- для помещений большого объема, когда размер очага пожара существенно меньше размеров помещения;
- для рабочих зон, расположенных на разных уровнях в пределах одного помещения (наклонный зрительный зал кинотеатра, антресоли и т.д.);

полевой метод:

- для помещений сложной геометрической конфигурации, а также помещений с большим количеством внутренних преград (атриумы с системой галерей и примыкающих коридоров, многофункциональные центры со сложной системой вертикальных и горизонтальных связей и т.д.);
- для помещений, в которых один из геометрических размеров гораздо больше (меньше) остальных (тоннели, закрытые автостоянки большой площади и т.д.);
- для иных случаев, когда применимость или информативность зонных и интегральных моделей вызывает сомнение (уникальные сооружения, распространение пожара по фасаду здания, необходимость учета работы систем противопожарной защиты, способных качественно изменить картину пожара, и т.д.).

Учитывая сложность объемно-планировочных решений рассматриваемого здания, выбираем полевой метод расчета.

Основой для полевых моделей пожаров являются уравнения, выражающие законы сохранения массы, импульса, энергии и масс компонентов в рассматриваемом малом контрольном объеме.

Уравнение сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0. \quad (1)$$

Уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i. \quad (2)$$

Для ньютоновских жидкостей, подчиняющихся закону Стокса, тензор вязких напряжений определяется выражением:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}. \quad (3)$$

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \dot{q}_j^R}{\partial x_j}, \quad (4)$$

где $h = h_0 + \int_{T_0}^T c_p dT + \sum_k Y_k H_k$ — статическая энтальпия смеси;

H_k — теплота образования k -го компонента;

$c_p = \sum_k Y_k c_{p,k}$ — теплоемкость смеси при постоянном давлении;

$\dot{q}_j^R$ — радиационный поток энергии в направлении x_j .

Уравнение сохранения химического компонента k :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j Y_k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right) + S_k. \quad (5)$$

Для замыкания системы уравнений (1)–(5) используется уравнение состояния идеального газа. Для смеси газов оно имеет вид:

$$p = \rho R_0 T \sum_k \frac{Y_k}{M_k}, \quad (6)$$

где R_0 — универсальная газовая постоянная;

M_k — молярная масса k -го компонента.

Полевая математическая модель расчета тепломассообмена при пожаре

Для расчета тепломассообмена используется полевая модель пожара, соответствующая модели. При этом решаются нестационарные трехмерные дифференциальные уравнения законов сохранения

массы, импульса и энергии для газовой среды помещения (уравнения Навье – Стокса в форме Рейнольдса), а также для компонентов газовой среды и оптической плотности дыма. Все дифференциальные уравнения приведены к стандартному виду [6], удобному для численного решения:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \Phi) + \operatorname{div}(\rho w \Phi) = \operatorname{div}(\Gamma \operatorname{grad} \Phi) + S, \quad (7)$$

где Φ — зависимая переменная;

Γ — коэффициент диффузии для Φ ;

S — источниковый член;

ρ — плотность газа, кг/м³;

w — скорость газа, м/с;

τ — время, с.

Все величины здесь и далее являются усредненными по времени.

Параметры и коэффициенты уравнения (7) приведены в таблице.

Используется k - ε -модель турбулентности со следующим набором эмпирических констант [7–14]: $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$; $C_\mu = 0,09$. Эффективная вязкость газа в уравнении (7) представлена в виде $\mu_{\text{эф}} = \mu + \mu_t$, эффективная теплопроводность: $\lambda_{\text{эф}} = \lambda + \lambda_t + \lambda_d$, эффективная диффузия: $D_{\text{эф}} = D + D_t$.

Для расчета турбулентного тепломассообмена также в качестве дополнительного подтверждения надежности полученных результатов применяется модель Смагоринского [15].

Вязкость газа определяется по формуле Сазерленда [7], турбулентная вязкость — по формуле Колмогорова [7]. Коэффициент турбулентной теплопроводности определяется из соотношения $\lambda_t = c_p \mu_t / \operatorname{Pr}_t$, а коэффициент турбулентной диффузии — $D_t = \mu_t / \rho \operatorname{Pr}_d$. Принимаем, что $\operatorname{Pr}_t = \operatorname{Pr}_d = 1$ [16].

Для расчета лучистого теплопереноса используется диффузионный метод (метод моментов) [17–20]. При этом $\lambda_d = 0$, а источниковый член в уравнении энергии имеет вид:

$$S_\lambda = -\frac{4\pi}{3} \left(\frac{\partial^2 I_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial z^2} \right), \quad (8)$$

где I_o — интенсивность излучения, определяемая из решения уравнения:

$$\frac{1}{k} \left(\frac{\partial^2 I_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial z^2} \right) = 3\chi(I_o - I_b), \quad (9)$$

где k, χ — интегральные коэффициенты ослабления и излучения среды;

$I_b = \sigma T^4$ — интенсивность излучения абсолютно черного тела;

σ — постоянная излучения абсолютно черного тела;

T — температура;

x, y, z — координаты вдоль длины, ширины и высоты соответственно.

Принимаем, что локальный интегральный коэффициент ослабления излучения равен локальному интегральному коэффициенту излучения (излучающая, поглощающая и нерассеивающая среда) и находится по локальной величине оптической плотности дыма:

$$k = \lambda^* W, \quad (10)$$

где W — локальная величина оптической плотности дыма, определяемая из решения соответствующего уравнения (7);

λ^* — коэффициент для пересчета оптического диапазона излучения в инфракрасный [1, 21, 22].

Массовая скорость газификации твердой пожарной нагрузки равна [2]:

$$\psi = \psi_{\text{уд}} \pi r^2, \quad (11)$$

где $r = w_{\text{пл}} \tau$ — радиус зоны горения.

В случае горючей жидкости [2]:

$$\tau \leq \tau_{\text{ст}}: \psi = \psi_{\text{уд}} F_{\text{г}} \sqrt{\tau / \tau_{\text{ст}}}; \quad (12)$$

$$\tau > \tau_{\text{ст}}: \psi = \psi_{\text{уд}} F_{\text{г}}, \quad (13)$$

где $\tau_{\text{ст}}$ — время стабилизации горения;

$\psi_{\text{уд}}$ — удельная массовая скорость газификации пожарной нагрузки.

Скорость выделения оптической плотности дыма при горении горючего материала [2, 23–26]:

$$W = W_{\text{уд}} \psi. \quad (14)$$

Область горения задается объемными источниками массы и тепла, равномерно распределенными в объеме области горения.

Граничные условия к уравнению (7) принимаются следующими:

а) на внутренних поверхностях ограждающих конструкций проекции скоростей равны нулю; для уравнения энергии задаются граничные условия 3-го рода; для остальных параметров принимается, что $\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$;

б) на открытом проеме $\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$ в области истечения газа наружу; в области поступления наружного воздуха внутрь давление, температура и концентрации компонентов соответствуют параметрам атмосферного воздуха, где n — нормаль к поверхности.

Уравнение (7) решается методом контрольных объемов [6] по неявной конечно-разностной схеме на шахматной сетке с помощью продольно-поперечной прогонки. При этом используется уравнение для поправки давления в сжимаемой форме. Распределение параметров газовой среды

внутри каждого контрольного объема принимается соответствующим схеме с разностями против потока. Точность расчетов контролируется выполнением локального и интегрального законов сохранения массы и энергии в расчетной области.

Расчет прогрева ограждающих конструкций проводится на основе трехмерных дифференциальных уравнений теплопроводности, решенных совместно с системой уравнений (7) (см. таблицу).

Полевая модель включена в нормативные методики расчета динамики опасных факторов пожара.

Более подробно описание математической модели приведено в [1]. Там же представлены результаты сопоставления расчета по предложенной модели с аналитическими решениями, интегральной моделью и экспериментальными данными.

Математическая модель расчета прогрева строительных конструкций

Для определения распределения температур внутри строительной конструкции в одномерном случае решается уравнение теплопроводности [27]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (15)$$

где ρ — плотность материала конструкции, кг/м³;
 c — удельная теплоемкость материала конструкции, Дж/(кг · К);
 T — температура, К;
 λ — коэффициент теплопроводности материала конструкции, Вт/(м · К);
 y — координата, направленная по толщине стенки конструкции, м;
 τ — время, с.

Параметры и коэффициенты уравнения (7)

Parameters and coefficients in equation (7)

Ф	Г	S
1	0	G_m
w_x	$\mu + \mu_T$	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial w_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial w_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\Gamma \operatorname{div} w)$
w_y	$\mu + \mu_T$	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial w_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial w_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial w_z}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\Gamma \operatorname{div} w)$
w_z	$\mu + \mu_T$	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial w_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial w_y}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\Gamma \operatorname{div} w) - \rho g - \frac{\partial p}{\partial z}$
X_{O_2}	$(D_{O_2} + D_{O_2T})\rho$	$-L_{O_2}\psi\eta$
X_{CO}	$(D_{CO} + D_{CO_T})\rho$	$L_{CO}\psi\eta$
X_{CO_2}	$(D_{CO_2} + D_{CO_2T})\rho$	$L_{CO_2}\psi\eta$
k	μ_T/σ_k	$v_T \left(\frac{\partial w_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) + \frac{g}{Pr_T} \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \varepsilon$
ε	μ_T/σ_ε	$C_1 \frac{\varepsilon}{k} v_T \left(\frac{\partial w_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) + \frac{g}{Pr_T} \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}$
W	0	$W_{yd}\psi$
i	$\lambda + \lambda_T + \lambda_{II}$	$\psi\eta Q_p^H - Q_{II} + \mu\Phi_{II}$

Уравнение (15) решается численным методом контрольных объемов [6].

Предполагаем идеальный тепловой контакт между слоями конструкции, изготовленными из различных материалов, что также является наиболее опасным вариантом с точки зрения нагрева конструкции.

Граничные условия к уравнению (15) являются граничными условиями 2-го рода. На границах расчетной области задается плотность теплового потока:

$$q_{\text{гр}} = f(\tau). \quad (16)$$

Плотность теплового потока на внешней (огневой) границе стенки определяется из решения уравнения полевой модели или по формулам расчета лучистого теплового потока.

Основой для расчета нагрева строительной конструкции от теплового излучения является уравнение лучистого теплообмена [28–30]:

$$q = \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left[\left(\frac{T_{\text{и}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 \right] \psi_{21}, \quad (17)$$

где q — плотность теплового потока, попадающего на поверхность конструкции, Вт/м²;

$T_{\text{и}}$ — температура излучающей поверхности, К;

$T_{\text{пов}}$ — температура на облучаемой поверхности конструкции, К;

$\varepsilon_{\text{пр}}$ — приведенная степень черноты системы;

c_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 5,7 Вт/(м²·К⁴);

ψ_{21} — коэффициент облученности между излучающей и облучаемой поверхностями, в который в неявной форме входит расстояние r по нормали между излучающей и облучаемой поверхностями.

Коэффициент облученности для одной четвертой части площади поверхности факела вычисляется по формуле [31]:

$$\psi_{21} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}} \arctg \frac{b}{\sqrt{a^2 + r^2}} + \frac{b}{\sqrt{b^2 + r^2}} \arctg \frac{a}{\sqrt{b^2 + r^2}} \right), \quad (18)$$

где r — расстояние между излучающей и облучаемой поверхностями по нормали, м;

a и b — стороны прямоугольника пламени [28], м.

За наступление предела огнестойкости строительной конструкции принимается момент времени от начала пожара, когда температура хотя бы в одном месте конструкции достигает критического значения.

Расчет по одномерному уравнению теплопроводности существенно завышает пределы огнестойкости конструкций, так как не учитывается

отвод тепла от огневой поверхности конструкции в продольном направлении конструкции.

Исходные данные для расчетов

Рассматриваем первый этап технического перевооружения пылеугольной ТЭЦ. На этом этапе выполняется замена двух турбин.

Класс функциональной пожарной опасности здания: Ф5 (электростанции).

Требуемые пределы огнестойкости несущих металлических конструкций в соответствии с СТУ на объект равны R15.

Здание главного корпуса, в том числе и машинное отделение, выполнено по каркасной схеме. Рама каркаса представляют собой стальные колонны, на которые опираются стальные стропильные фермы или балки покрытия, а также междуэтажные балки перекрытий. Основными элементами несущего каркаса здания, обеспечивающими жесткость и устойчивость в поперечном направлении, являются плоские поперечные рамы, образованные стальными колоннами, жестко заземленными в фундаментах и опирающимися на них металлическими стропильными фермами. В продольном направлении жесткость здания обеспечивается постановкой наклонных и горизонтальных связей по каждому ряду колонн. Высота здания до низа стропильных ферм составляет 21,60 м. Здание машинного отделения № 2 оборудовано мостовым краном 100/20 т.

Ограждением служат кирпичные стены из глиняного полнотелого кирпича на цементно-песчаном растворе, толщина стен по осям А, Б — 640 (720) мм, по оси В — 250 мм, местами стены выполнены из навесных панелей.

Колонны смонтированы с шагом 6,5 м. Жесткость и устойчивость каркаса производственного здания обеспечивается: жесткой заделкой колонн в фундамент с помощью анкерных болтов; в поперечном направлении — многоэтажной двухпролетной этажеркой (пролеты Б-Г), к которой шарнирно примыкают фермы машинного отделения и котельных, а также рамы помещений электрофильтров и дымососного отделения; в продольном направлении — вертикальными крестовыми связями между колоннами.

Стальные опорные конструкции трубопроводов и оборудования выполняются из прокатных профилей по ГОСТ 26020–83⁵, ГОСТ 8240–97⁶,

⁵ ГОСТ 26020–83. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Сортамент: постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 17 декабря 1983 г. № 6095, дата введения установлена 01 января 1986 г.

⁶ ГОСТ 8240–97. Швеллеры стальные горячекатаные. Сортамент: принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 11 от 23 апреля 1997 г.).

ГОСТ 8509–93⁷, ГОСТ 30245–2003⁸, ГОСТ Р 57837–2017⁹ или сварных сечений.

Рассматриваем наиболее опасный сценарий развития пожара с точки зрения нагрева несущих металлических конструкций: горение пролива турбинного масла на площади 16 м² на отм. 0,000 в машинном отделении с паровыми турбинами.

Наибольшему тепловому воздействию подвергаются:

- колонна КА1 с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 8,893$ мм;
- фермы L 60×5 с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 2,4$ мм.

Теплофизические свойства стальных конструкций определялись по [9, 16]:

- плотность — $\rho = 7800$ кг/м³;
- удельная теплоемкость — $c = 470 + 0,21t + 5,0 \times 10^{-4}t^2$ Дж/(кг · К);
- коэффициент теплопроводности — $\lambda = 58 - 0,042t$ Вт/(м · К), где t — температура, °С.

⁷ ГОСТ 8509–93. Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент: принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 3 от 17 февраля 1993 г.).

⁸ ГОСТ 30245–2003. Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. Технические условия (с Поправкой): принят Межгосударственной научнотехнической комиссией по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (МНТКС) 22 октября 2003 г.

⁹ ГОСТ Р 57837–2017. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Технические условия (с Поправкой, с Изменением № 1): утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 октября 2017 г. № 1515-ст.

Критическую температуру для стальных конструкций принимаем равной $T_{кр} = 500$ °С [3, 5, 32–35].

Пожарно-технические характеристики горючих материалов в помещениях здания определялись по типовой базе пожарной нагрузки [35]:

- турбинное масло:
низшая рабочая теплота сгорания — $Q_n^p = 41,9$ МДж/кг;
удельная скорость выгорания — $\psi_{уд} = 0,03$ кг/(м² · с);
потребление кислорода при горении — $L_{O_2} = -2,82$;
выделение окиси углерода — $L_{CO} = 0,122$;
выделение двуокиси углерода — $L_{CO_2} = 0,7$;
удельное дымовыделение — $W_{уд} = 243$ Нп · м²/кг.
Концентрация кислорода, при которой прекращается горение, в расчетах принята равной $X_{O_2, min} = 14$ % (по массе).

Параметры атмосферного воздуха принимались следующими:

- температура — 20 °С;
- давление — $1,013 \cdot 10^5$ Па.

Результаты расчетов и их обсуждение

Расчеты динамики опасных факторов пожара и пределов огнестойкости строительных конструкций здания выполнены с использованием программного комплекса [3, 4].

Результаты расчетов температурного режима пожара и фактических пределов огнестойкости несущих металлических конструкций представлены на рис. 1–3, где показаны поля температур, °С, скоростей, м/с, и схемы течения в поперечных и продольных сечениях очага пожара, проходящих через источник возгорания.

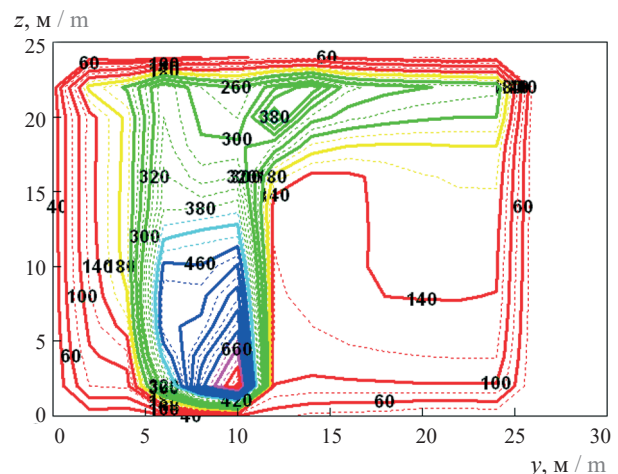
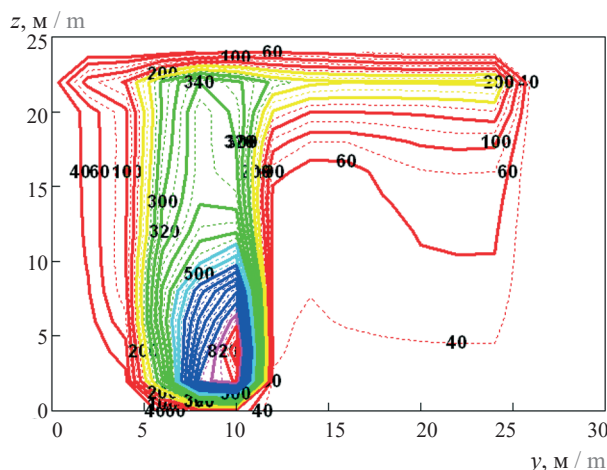


Рис. 1. Поля температур в поперечном сечении машинного отделения с паровыми турбинами, проходящего через источник возгорания, через 5 и 15 мин от начала реального пожара

Fig. 1. Temperature fields in the cross-section of an engine room that has steam turbines, passing through the ignition source, 5 and 15 min after the fire gets started

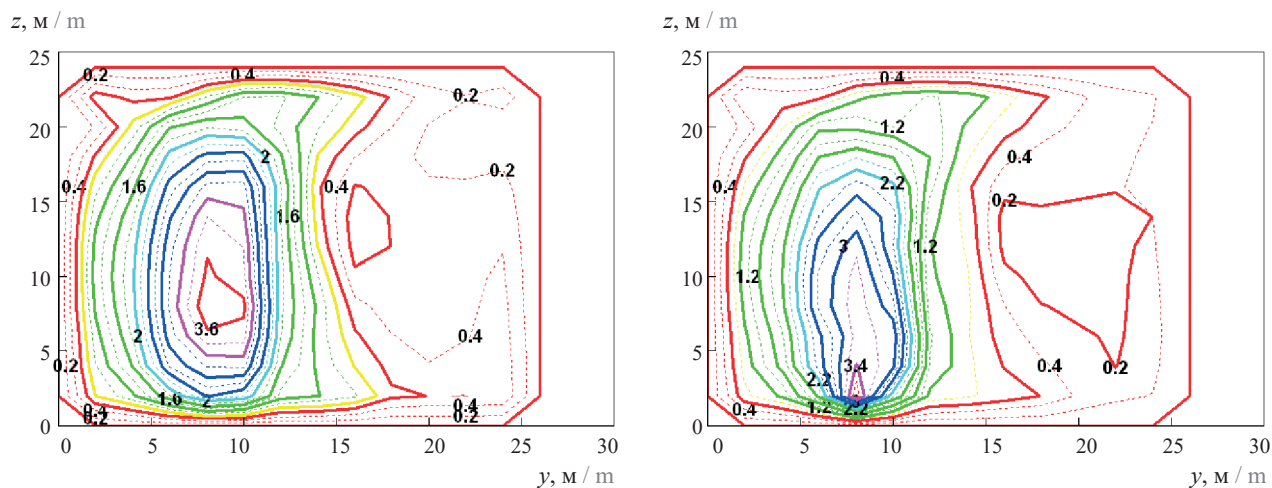


Рис. 2. Поля скоростей в поперечном сечении машинного отделения с паровыми турбинами, проходящего через источник возгорания, через 5 и 15 мин от начала реального пожара

Fig. 2. Velocity fields in the cross-section of an engine room that has steam turbines, passing through the ignition source, 5 and 15 min after the fire gets started

Координаты x , y и z направлены вдоль длины, ширины и высоты здания соответственно.

На рис. 4 представлены зависимости максимальных температур колонны КА1 с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 8,893$ мм и фермы L 60×5 с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 2,4$ мм, расположенной на отметке +23,950.

Результаты расчетов показали, что при наиболее опасном сценарии развития пожара максимальные температуры несущих металлических конструкций в течение 15 мин от начала пожара существенно меньше критической температуры $T_{кр} = 500$ °C.

Таким образом, огнезащита несущих металлических конструкций, расположенных в машинном отделении с паровыми турбинами, не требуется.

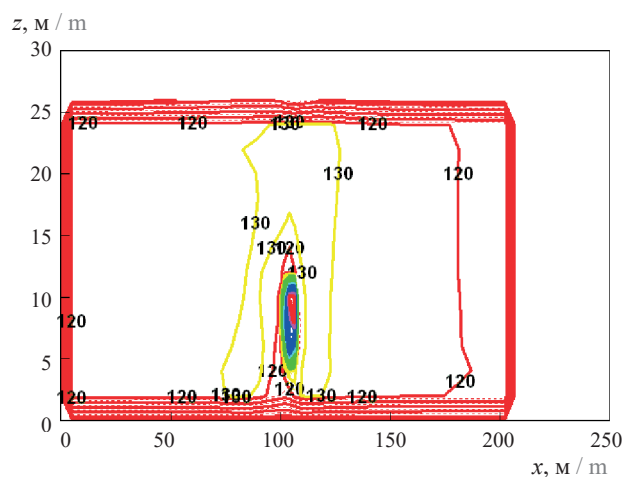


Рис. 3. Поля температур в продольном сечении машинного отделения с паровыми турбинами, проходящего через источник возгорания, через 5 и 15 мин от начала реального пожара

Fig. 3. Temperature fields in the longitudinal section of an engine room that has steam turbines, passing through the ignition source, 5 and 15 min after the fire gets started

Выводы

Проведенные расчеты фактических пределов огнестойкости несущих металлических конструкций, находящихся в ТЭЦ, показали, что при наиболее опасном сценарии развития реального пожара фактические пределы огнестойкости несущих металлических конструкций больше требуемых R15, поэтому огнезащита вышеуказанных конструкций не требуется.

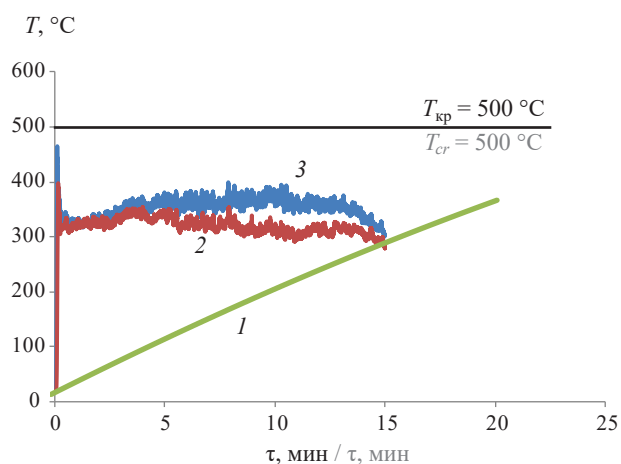


Рис. 4. Зависимости характерных температур развития пожара: 1 — максимальная температура колонны КА1 с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 8,893$ мм; 2 — максимальная температура фермы L 60×5 с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 2,4$ мм, расположенной на отметке +23,950; 3 — максимальная температура фермы L 60×5 с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 2,4$ мм, расположенной на отметке +21,400

Fig. 4. The relationship between characteristic fire temperatures: 1 — the maximal temperature of column KA1 with reduced thickness $\delta_{red} = 8.893$ mm; 2 — the maximal temperature of roof truss L 60×5 with reduced thickness $\delta_{red} = 2.4$ mm, at the level of +23.950; 3 — the maximal temperature of roof truss L 60×5 with reduced thickness $\delta_{red} = 2.4$ mm, at the level of +21.400

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. 336 с.
2. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учеб. пособие. М. : Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.
3. Пузач С.В., Зернов С.И., Богатищев А.И., Карпов С.Ю. Расчет фактических пределов огнестойкости строительных конструкций с учетом реальных параметров пожара, действий систем пожаротушения, механической вентиляции и дымоудаления (математическая модель и методика расчета). Саранск : Мордовское книжное издательство, 2004. 80 с.
4. Пузач С.В. Интегральные, зонные и полевые методы расчета динамики опасных факторов пожара : свидетельство об официальной регистрации программы № 2006614238 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам от 08.12.2006. № 2006613462; заявл. 12.10.2006.
5. Пузач С.В. Определение огнестойкости строительных конструкций с учетом параметров реального пожара : свидетельство об официальной регистрации программы № 2006614237 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам от 08.12.2006 г.
6. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М. : Энергоатомиздат, 1984. 150 с.
7. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М. : Наука, 1987. 840 с.
8. Hosoya T., Kawamoto H., Saka S. Pyrolysis behaviors of wood and its constituent polymers at gasification temperature // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2007. Vol. 78. Pp. 328–336. DOI: 10.1016/j.jaap.2006.08.008
9. Boonmee N., Quintiere J.G. Glowing and flaming autoignition of wood // Proceedings of the Combustion Institute. 2002. Vol. 29. Issue 1. Pp. 289–296.
10. Zelinka S.L., Pei S., Bechle N., Sullivan K., Ottum N., Rammer D.R., Hasburgh L.E. et al. Performance of wood adhesive for cross laminated timber under elevated temperatures // Proceedings, WCTE 2018-world conference on timber engineering, Seoul, Republic of Korea. 2018. 7 p.
11. Boonmee N.A. A theoretical investigation of surface glowing ignition leading to gas flaming autoignition // Fire Safety Science. 2005. Vol. 8. Pp. 139–150. DOI: 10.3801/iafss.fss.8-139
12. Babrauskas V. Ignition of wood: A review of the state of the art // Journal of Fire Protection Engineering. 2002. Vol. 12. Issue 3. Pp. 163–189. DOI: 10.1177/10423910260620482
13. Anon ANSI/APA PRG 320: standard for performance rated cross-laminated timber. APA — The Engineered Wood Association, Tacoma. 2018.
14. Merryweather G., Spearpoint M.J. Flame spread measurements on wood products using the ASTM E 1321 LIFT apparatus and a reduced scale adaptation of the cone calorimeter // Flame and Materials. 2010. Vol. 34. Issue 3. Pp. 109–136. DOI: 10.1002/fam.1001
15. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations // Monthly Weather Review. 1963. Vol. 91. Issue 3. Pp. 99–164. DOI: 10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWT P>2.3.CO;2
16. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М. : Атомиздат, 1979. 416 с.
17. Кошмаров Ю.А. Теплотехника. М. : Академия ГПС МЧС России, 2006. 501 с.
18. White R.H., Dietsenberger M.A. Fire Safety // Wood Handbook — Wood as an Engineering Material, Ch. 17. US : Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, 2002. 508 p.
19. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B., Thanh D.D. Heat and smoke release at the combustion of the different wood varieties // Fire science and technology 6th Asia — Oceania symposium Daegu, Korea, Korean Institute of Fire Science and Engineering, March 17–20. 2004. Pp. 203–211.
20. Ушанов В.В., Фадеев В.Е., Харитонов В.С., Щелкунов В.И., Павловский А.В., Косачев А.А. Огнестойкость и пожарная опасность сэндвич-панелей и предложения по внесению изменений в нормативные правовые акты по пожарной безопасности в части их применения в зданиях и сооружениях различного функционального назначения // Пожарная безопасность. 2016. № 4. С. 119–122. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27521504>
21. Lyon R.E., Quintiere J.G. Criteria for piloted ignition of combustible solids // Combustion and Flame. 2007. Vol. 151. Issue 4. Pp. 551–559. DOI: 10.1016/J.COMBUSTFLAME.2007.07.020

22. *Andersen J.* Experimental study of the thermal resistance of intumescent coatings exposed to different heating rates : Master of Science thesis, Civil Engineering Department, Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark, 2015.
23. *Su J., Lafrance P.-S., Hoehler M., Bundy M.* Fire safety challenges of tall wood buildings phase 2: task 2 & 3 cross laminated timber compartment fire tests, fire protection research foundation, Quincy, MA U.S. Energy Information Administration (EIA) (s.d.) Consulté 22 novembre 2019, à l'adresse. 2018. URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/>
24. *Simões G., Magalhães D., Rabaçal M., Costa M.* Effect of gas temperature and oxygen concentration on single particle ignition behavior of biomass fuels // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2017. Vol. 36. Issue 2. Pp. 2235–2242. DOI: 10.1016/j.proci.2016.06.102
25. *Corbetta A.F., Frassoldati A., Bennadji H., Smith K., Serapiglia M.J., Gauthier G. et al.* Pyrolysis of centimeter-scale woody biomass particles: kinetic modeling and experimental validation // *Energy & Fuels*. 2014. Vol. 28. Issue 6. Pp. 3884–3898. DOI: 10.1021/ef500525v
26. *Di Blasi C., Branca C., Santoro A., Hernandez E.G.* Pyrolytic behaviour and products of some wood varieties // *Combustion and Flame*. 2001. Vol. 124. Issue 1-2. Pp. 165–177. DOI: 10.1016/S0010-2180(00)00191-7
27. Пожарная нагрузка. Справочник. Редакция 2. 15.05.2014. Строительные Информационные Технологии и Системы. СИТИС-СПИ-1. 2014. 53 с.
28. *Suzuki J., Mizukami T., Naruse T., Araki Y.* Fire resistance of timber panel structures under standard fire exposure // *Fire Technology*. 2019. Vol. 52. Issue 4. Pp. 1015–1034. DOI: 10.1007/s10694-016-0578-2
29. *Haseli Y., Van Oijen J.A., De Goey L.P.H.* A detailed one-dimensional model of combustion of a woody biomass particle // *Bioresource Technology*. 2011. Vol. 102 (20). Pp. 9772–9782. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.07.075
30. *Janssens M.* Development of a fire performance assessment methodology for qualifying cross-laminated timber adhesives. SwRI Project No. 01.23086.01.001a, Southwest Research Institute, San Antonio, TX. 2017. 78 p.
31. *Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B.* Fire behavior and fire protection in timber buildings. Germany : Springer Series in Wood Science, 2014. 280 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7460-5
32. *Болдырев А.С., Золотов П.П., Люсов А.Н., Кабанов Н.П., Филиппович Н.И.* Строительные материалы : справочник / под ред. А.С. Болдырева. М. : Стройиздат, 1989. 567 с.
33. *Яковлев А.Я.* Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 143 с.
34. *Wang L., Dong Y., Zhang D., Zhang D., Zhang C.* Experimental study of heat transfer in intumescent coatings exposed to non-standard furnace curves // *Fire Technology*. 2015. Vol. 51. Issue 3. Pp. 627–643. DOI: 10.1007/s10694-015-0460-7
35. *Suzuki J., Mizukami T., Naruse T., Araki Y.* Fire resistance of timber panel structures under standard fire exposure // *Fire Technology*. 2016. Vol. 52. No. 4. Pp. 1015–1034. DOI: 10.1007/s10694-016-0578-2

REFERENCES

1. *Puzach S.V.* *Methods for calculating heat and mass transfer during a fire in a room and their application in solving practical problems of fire and explosion safety*. Moscow, Academy of GPS EMERCOM of Russia, 2005; 336. (rus).
2. *Koshmarov Yu.A.* *Forecasting hazardous factors of a fire in a room : tutorial*. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2000; 118. (rus).
3. *Puzach S.V., Zernov S.I., Bogatishchev A.I., Karpov S.Yu.* *Calculation of the actual limits of fire resistance of building structures, taking into account the real parameters of the fire, the actions of fire extinguishing systems, mechanical ventilation and smoke removal (mathematical model and calculation method)*. Saransk, Mordovian book publishing house, 2004; 80. (rus).
4. *Puzach S.V.* *Integral, zone and field methods for calculating the dynamics of fire hazards* : Certificate of official registration of the program No. 2006614238 in the Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks dated December 8, 2006. No. 2006613462; December 10, 2006. (rus).
5. *Puzach S.V.* *Determination of fire resistance of building structures, taking into account the parameters of a real fire* : Certificate of official registration of the program No. 2006614237 with the Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks dated December 8, 2006. (rus).
6. *Patankar S.* *Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984; 150. (rus).

7. Loitsyansky L.G. *Mechanics of liquid and gas*. Moscow, Nauka Publ., 1987; 840. (rus).
8. Hosoya T., Kawamoto H., Saka S. Pyrolysis behaviors of wood and its constituent polymers at gasification temperature. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2007; 78:328-336. DOI: 10.1016/j.jaap.2006.08.008
9. Boonmee N., Quintiere J.G. Glowing and flaming autoignition of wood. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2002; 29(1):289-296.
10. Zelinka S.L., Pei S., Bechle N., Sullivan K., Ottum N., Rammer D.R., Hasburgh L.E. Performance of wood adhesive for cross laminated timber under elevated temperatures. *Proceedings, WCTE 2018-world conference on timber engineering, Seoul, Republic of Korea*. 2018; 7.
11. Boonmee N.A. A theoretical investigation of surface glowing ignition leading to gas flaming autoignition. *Fire Safety Science*. 2005; 8:139-150. DOI: 10.3801/iafss.fss.8-139
12. Babrauskas V. Ignition of wood: A review of the state of the art. *Journal of Fire Protection Engineering*. 2002; 12(3):163-189. DOI: 10.1177/10423910260620482
13. Anon ANSI/APA PRG 320: *standard for performance rated cross-laminated timber*. APA — The Engineered Wood Association, Tacoma. 2018.
14. Merryweather G., Spearpoint M.J. Flame spread measurements on wood products using the ASTM E 1321 LIFT apparatus and a reduced scale adaptation of the cone calorimeter. *Flame and Materials*. 2010; 34(3):109-136. DOI: 10.1002/fam.1001
15. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. *Monthly Weather Review*. 1963; 91(3):99-164. DOI: 10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2
16. Kutateladze S.S. *Fundamentals of the theory of heat transfer*. Moscow, Atomizdat Publ., 1979; 416. (rus).
17. Koshmarov Yu.A. *Heat engineering*. Moscow, Academy of GPS EMERCOM of Russia, 2006; 501. (rus).
18. White R.H., Dietenberger M.A. Fire Safety. *Wood Handbook — Wood as an Engineering Material, Ch. 17*. US, Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, 2002; 508.
19. Aseeva R.M., Serkov V.V., Sivenkov A.B., Thanh D.D. Heat and smoke release at the combustion of the different wood varieties. *Fire science and technology 6th Asia — Oceania symposium Daegu, Korea, Korean Institute of Fire Science and Engineering, March 17 (Wed) – 20 (Sat)*. 2004. Pp. 203–211.
20. Ushanov V.V., Fadeev V.E., Kharitonov V.S., Shchelkunov V.I., Pavlovsky A.V., Kosachev A.A. Fire resistance and fire hazard of sandwich panels and the proposals on amendments to the normative legal acts on fire safety regarding their application in buildings and structures of various functionality. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2016; 4:119-122. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27521504> (rus).
21. Lyon R.E., Quintiere J.G. Criteria for piloted ignition of combustible solids. *Combustion and Flame*. 2007; 151(4):551-559. DOI: 10.1016/J.COMBUSTFLAME.2007.07.020
22. Andersen J. *Experimental study of the thermal resistance of intumescent coatings exposed to different heating rates*: Master of Science thesis, Civil Engineering Department, Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark, 2015.
23. Su J., Lafrance P.-S., Hoehler M., Bundy M. Fire safety challenges of tall wood buildings phase 2: task 2 & 3 cross laminated timber compartment fire tests, fire protection research foundation, Quincy, MA U.S. Energy Information Administration (EIA) (s.d.) Consulté 22 November 2019, à l'adresse. 2018. URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/>
24. Simões G., Magalhães D., Rabaçal M., Costa M. Effect of gas temperature and oxygen concentration on single particle ignition behavior of biomass fuels. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2017; 36(2):2235-2242. DOI: 10.1016/j.proci.2016.06.102
25. Corbetta A.F., Frassoldati A., Bennadji H., Smith K., Serapiglia M.J., Gauthier G. et al. Pyrolysis of centimeter-scale woody biomass particles: kinetic modeling and experimental validation. *Energy & Fuels*. 2014; 28(6):3884-3898. DOI: 10.1021/ef500525v
26. Di Blasi C., Branca C., Santoro A., Hernandez E.G. Pyrolytic behaviour and products of some wood varieties. *Combustion and Flame*. 2001; 124(1-2):165-177. DOI: 10.1016/S0010-2180(00)00191-7
27. *Fire load. Directory. Edition 2. May 15, 2014. Building Information Technologies and Systems. SITIS-SPN-I*. 2014; 54. (rus).
28. Suzuki J., Mizukami T., Naruse T., Araki Y. Fire resistance of timber panel structures under standard fire exposure. *Fire Technology*. 2019; 52(4):1015-1034. DOI: 10.1007/s10694-016-0578-2
29. Haseli Y., Van Oijen J.A., De Goey L.P.H. A detailed one-dimensional model of combustion of a woody biomass particle. *Bioresource Technology*. 2011; 102(20):9772-9782. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.07.075

30. Janssens M. *Development of a fire performance assessment methodology for qualifying cross-laminated timber adhesives*. SwRI Project No. 01.23086.01.001a, Southwest Research Institute, San Antonio, TX. 2017; 78.
31. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. *Fire behavior and fire protection in timber buildings*. Germany, Springer Series in Wood Science, 2014; 280. DOI: 10.1007/978-94-007-7460-5
32. Boldyrev A.S., Zolotov P.P., Lyusov A.N., Kabanov N.P., Filippovich N.I. *Building materials : a Handbook*. A.S. Boldyreva (ed.). Moscow, Stroyizdat Publ., 1989; 567. (rus).
33. Yakovlev A.Ya. *Calculation of fire resistance of building structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 143. (rus).
34. Wang L., Dong Y., Zhang D., Zhang D. and Zhang C. Experimental study of heat transfer in intumescent coatings exposed to non-standard furnace curves. *Fire Technology*. 2015; 51(3):627-643. DOI: 10.1007/s10694-015-0460-7
35. Suzuki J., Mizukami T., Naruse T., Araki Y. Fire resistance of timber panel structures under standard fire exposure. *Fire Technology*. 2016; 52(4):1015-1034. DOI: 10.1007/s10694-016-0578-2

*Поступила 08.10.2021, после доработки 01.11.2021;
принята к публикации 18.11.2021*

*Received October 8, 2021; Received in revised form November 1, 2021;
Accepted November 18, 2021*

Информация об авторах

ПУЗАЧ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 18265; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus Author ID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

ЕРЕМИНА Татьяна Юрьевна, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 274777; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Sergey V. PUZACH, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Professor of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 18265; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus Author ID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

Tatyana Yu. EREMINA, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 274777; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.