

Расчет пределов огнестойкости строительных конструкций здания теплоэлектростанции

Сергей Викторович Пузач, Татьяна Юрьевна Еремина,
Федор Александрович Портнов ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В данной статье проведены расчеты фактических пределов огнестойкости металлических конструкций для одного из зданий теплоэлектростанции. Известно, что фактические пределы огнестойкости строительных конструкций определяются экспериментальными и расчетными методами. Исследования для решения задачи были основаны на температурном режиме реальных условий пожара.

Цель и задачи исследования. Целью анализа является определение фактических пределов огнестойкости строительных конструкций здания теплоэлектростанции методом расчета тепломассообмена, учитывающим реальные условия пожара. В соответствии с поставленной целью необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ основных положений нормативно-технической документации в части требований пожарной безопасности к строительным конструкциям теплоэлектростанций;
- обосновать основные положения для метода расчета тепломассообмена, учитывающего реальные условия пожара;
- обосновать необходимость повышения фактических пределов огнестойкости с помощью огнезащитных средств с учетом наиболее опасного сценария развития реального пожара.

Методы исследования. Уравнение теплопроводности рассматривается для определения распределения температур внутри строительной конструкции в одномерном случае. Для решения данной задачи применен полевой метод расчета, который используется для помещений сложной геометрической конфигурации, в которых один из геометрических размеров гораздо больше остальных.

Результаты и их обсуждение. В работе проводится анализ наиболее опасного сценария пожара, который характеризуется наиболее опасным воздействием на металлоконструкции — пожар мазута, разлитого в котельном отделении.

Рассматривается наиболее опасный сценарий развития пожара с точки зрения нагрева несущих металлических конструкций — горение пролива мазута в котельном отделении. Результаты расчетов показали, что при выбранном сценарии развития пожара максимальные температуры несущих металлических конструкций в течение 15 мин от начала пожара существенно меньше критической температуры 500 °С.

Выводы. На основании анализа расчета огнестойкости конструкций ТЭЦ, в частности металлоконструкций, было заключено, что их огнестойкость при возникновении чрезвычайной ситуации с наиболее опасными проявлениями пожара превышает требуемый R15. Огнезащита несущих металлических конструкций, расположенных в котельном отделении объекта, не требуется.

Ключевые слова: фактический предел огнестойкости; сценарий пожара; полевая модель; тепломассообмен; прогрев конструкций

Для цитирования: Пузач С.В., Еремина Т.Ю., Портнов Ф.А. Расчет пределов огнестойкости строительных конструкций здания теплоэлектростанции // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 5. С. 33–42. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.33-42

✉ Портнов Федор Александрович, e-mail: f.portnov@ikbs-mgsu.ru

Building structures of thermal power plants: analysis of fire resistance limits

Sergey V. Puzach, Tatyana Yu. Eremina, Fedor A. Portnov ✉

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

ABSTRACT

Introduction. The author analyzes real-life fire resistance limits of metal structures for one building of a thermal power plant. Experimental and computational methods were applied to identify the fire resistance limits of

building structures. The temperature setting of the research, conducted to solve the problem, was the same as that of a real fire.

Research goal and objectives. The purpose of the analysis is to identify the fire resistance limits of structures comprising the building of a thermal power plant using the method of heat-mass exchange analysis that takes account of conditions of a real fire. The following objectives are to be attained in compliance with the pre-set goal:

- to analyze the principal provisions of technical norms and regulations in terms of the fire safety of building structures of thermal power plants;
- to justify the principal provisions for the method of heat-mass exchange analysis, taking into account real-life fire conditions;
- to justify the need to improve the real-life fire resistance limits by fire-proofing agents with account taken of the most dangerous scenario of the real fire development.

Methods of research. The heat-transfer equation is analyzed to identify the distribution of temperatures inside a building structure for a one-dimensional case. The field-based method of analysis is applied to solve this problem. This method is generally applied to premises having complex geometric configuration, if one geometric dimension exceeds the others.

Results and their discussion. The authors have analyzed the most dangerous fire scenario characterized by the most dangerous impact on metal structures, such as the furnace oil fire spill in a boiler room.

The authors also address the most dangerous fire propagation scenario in terms of the heating of bearing metal structures: the combustion of furnace oil spills in a boiler room. The computations have proven that in case of the selected fire development scenario maximal temperatures of bearing metal structures are much lower than the critical temperature of 500 °C fifteen minutes after the onset of fire.

Conclusions. Having analyzed the fire resistance computations of thermal power plant structures, including their metal constructions, the authors have found that in case of emergency, resistance to the most dangerous manifestations of fire exceeds the required R15 value. No fireproofing of bearing metal structures in the boiler room is needed.

Keywords: real-life fire resistance limit; fire scenario; field model; heat-mass exchange; heating of structures

For citation: Puzach S.V., Eremina T.Yu., Portnov F.A. Building structures of thermal power plants: analysis of fire resistance limits. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5):33-42. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.33-42 (rus).

✉ Fedor Aleksandrovich Portnov, e-mail: f.portnov@ikbs-mgsu.ru

Введение

«Пожарную опасность теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) в соответствии с нормативными документами рассматривают с учетом временных параметров развития и распространения опасных факторов пожара, что

позволяет определить риск для людей и конструкций объектов и выбрать наиболее эффективные системы противопожарной защиты» [1].

Для исследования распределения температур внутри строительной конструкции и определения фактического предела огнестойкости необходимо учитывать условия реального пожара. На ТЭС все энергоблоки размещаются в одном здании, что при авариях повышает опасность распространения пожара, и как результат — выхода из строя нескольких агрегатов ТЭС [2–4].

На основании Федерального закона от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», к основным составляющим объектов ТЭС, идентифицированных по предельному количеству опасных веществ, определяющих риск поражающего воздействия на персонал, население и прилегающую территорию, относятся система мазуто-снабжения, цех химводоочистки с баками химреагентов, система маслоснабжения ТЭЦ. В работах [5, 6] описывается возможный значительный ущерб в случае возникновения чрезвычайных ситуаций на объектах ТЭС.

Здания ТЭЦ — здания 1–2-й степени огнестойкости. Главный корпус включает в себя котельный цех, машинный зал, служебные помещения, главный щит управления и распределительные устройства генераторного напряжения. Распределительные устройства высокого напряжения располагаются отдельно от главного корпуса.

Согласно статистике, порядка 90 % крупных аварий вызваны отказами в работе оборудования и сопровождаются пожаром, 10 % являются следствием повреждений строительных конструкций.

На территории ТЭЦ-27 (Мытищи) 11 июля 2019 г. загорелась газовая станция высокого давления, площадь возгорания составила 200 м² (рис. 1).

На Абаканской ТЭЦ (Хакасия) 21 марта 2019 г. произошло возгорание угольной пыли над подачей котла № 2; пожар, охвативший площадь в 10 м², был потушен. Погибших и пострадавших не было.

На Новомосковской ТЭЦ (Новомосковская ГРЭС — производственное подразделение филиала «Центральная генерация» ПАО «Квадра») в Тульской области 1 марта 2019 г. при осмотре было обнаружено возгорание трансформатора, которое



Рис. 1. Пожар на территории ТЭЦ (Мытищи)

Fig. 1. Fire on the territory of the thermal power plant (Mytishchi)

ликвидировали пожарные. Трансформатор был поврежден, потребовалась его замена.

На Челябинской ТЭЦ-2 16 октября 2018 г. произошла технологическая вспышка без последующего горения, пострадал работник предприятия. Из-за утечки и возгорания водорода из корпуса газоохладителя генератора был отключен турбогенератор.

На территории ТЭЦ № 22 (Дзержинский Московской области) 31 августа 2017 г. загорелось масло на площади 10 м². Специалистам удалось ликвидировать открытое горение.

На территории ТЭЦ-2 в Ленинском районе Новосибирска 26 августа 2017 г. после взрыва трансформатора произошел пожар. Возгорание было ликвидировано, никто не пострадал. Происшествие привело к отключениям света в Новосибирске.

В помещении циркуляционной насосной ТЭЦ-21 на севере Москвы 29 мая 2017 г. в результате урагана, вызвавшего повреждение линий электропередачи, произошло короткое замыкание. Возникшее задымление было оперативно ликвидировано, в результате инцидента никто не пострадал.

На Орской ТЭЦ-1 в Оренбургской области 4 мая 2017 г. произошло возгорание градирни из-за нарушения правил техники безопасности работниками подрядной организации во время проведения покрасочных работ. Площадь пожара составила 1,2 тыс. м². Люди не пострадали, эвакуация сотрудников ТЭЦ-1 не производилась. Огнем было повреждено внутреннее оборудование градирни¹.

Известно, что конструкция с фактическим пределом огнестойкости сохраняет свою несущую

функцию в течение периода времени, необходимого для обеспечения безопасности:

$$R_f > R_{req}, \quad (1)$$

где R_f — фактическое значение предела огнестойкости конструкции;

R_{req} — требуемое значение предела огнестойкости конструкции.

При определении пределов огнестойкости металлических конструкций котельного отделения здания теплоэлектростанции использован метод расчета тепломассообмена, учитывающий реальные условия пожара [7, 8].

Оценка реального пожара проводилась с применением полевого расчетного метода оценки динамики развития опасных факторов пожара, который основывается на научно-технических трудах [9–12] и реализован методами компьютерно-математического моделирования [13–15].

Целью анализа является определение фактических пределов огнестойкости строительных конструкций здания теплоэлектростанции методом расчета тепломассообмена, учитывающим реальные условия пожара. Для этого необходимо: провести анализ основных положений нормативно-технической документации в части требований пожарной безопасности к строительным конструкциям теплоэлектростанций, а также научно-технической литературы, описывающей динамику тепломассообменных процессов при пожарах; обосновать основные положения для метода расчета тепломассообмена, учитывающего реальные условия пожара; обосновать необходимость повышения фактических пределов огнестойкости с помощью огнезащитных средств с учетом наиболее опасного сценария развития реального пожара.

Методология расчета

На основании методик оценки расчетных величин пожарного риска в зданиях и сооружениях был произведен выбор конкретной модели расчета динамики развития опасных факторов пожара^{2, 3}. С учетом сложности поставленной задачи, связанной с особенностями объемно-планировочных решений, была выбрана полевая модель расчета.

«В методике оценки расчетных величин пожарного риска приведена полевая модель пожара, кото-

¹ ЧП на российских ТЭЦ в 2017–2019 годах. URL: <https://ria.ru/20190711/1556417484.html>

² Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности. Приложение к приказу МЧС России от 30.06.2009 № 382.

³ Изменения, вносимые в методику определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности, утвержденные приказом МЧС России от 30.06.2009 № 382. Приложение к приказу МЧС России от 12.12.2011 № 749.

рая используется для расчета тепломассообмена. Данная модель отличается применением нестационарных трехмерных дифференциальных уравнений. В данных уравнениях учтены законы сохранения массы, импульса и энергии применительно к газовой среде помещения, а также для характеристики аэрозолей дыма, в частности, их оптической плотности и для компонентов газовой среды» [1]. Для применения полевой модели были использованы основы динамики тепломассообменных процессов при пожарах [16–22].

Трехмерные дифференциальные уравнения, используемые в методике оценки расчетных величин пожарного риска, приведены в удобный для применения и численного решения вид [23]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho\Phi) + \operatorname{div}(\rho w\Phi) = \operatorname{div}(\Gamma \operatorname{grad} \Phi) + S, \quad (2)$$

где τ — время, с;

ρ — плотность, кг/м³;

Φ — зависимая переменная (энтальпии газовой смеси и материала стен и перекрытия, проекции скорости на координатные оси, концентрации компонентов газовой смеси, кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации, характеристики аэрозолей дыма — массовая концентрация и оптическая плотность);

w — скорость, м/с;

Γ — коэффициент диффузии для Φ ;

S — источниковый член.

Используемые здесь и далее величины усреднены по времени.

Используется k - ϵ модель турбулентности со следующим набором эмпирических констант [24]: $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\epsilon = 1,3$; $C_\mu = 0,09$. Эффективная вязкость газа в уравнении (2) представлена в виде $\mu_{\text{эф}} = \mu + \mu_t$, эффективная теплопроводность $\lambda_{\text{эф}} = \lambda + \lambda_t + \lambda_r$, эффективная диффузия $D_{\text{эф}} = D + D_t$ [1].

Для дополнительного свидетельства о надежности результатов проводится оценка турбулентного тепломассообмена с использованием модели Смагоринского [25].

По формуле Сазерленда проводится оценка вязкости газа, а по формуле Колмогорова [24] — турбулентная вязкость. Из соотношения $\lambda_t = c_p \mu_t / Pr_t$ проводится оценка коэффициента турбулентной теплопроводности, а коэффициента турбулентной диффузии — из соотношения $D_t = \mu_t / \rho Pr_d$. Принимаем, что $Pr_t = Pr_d = 1$ [26].

Для проведения оценки лучистого теплопереноса используется «метод моментов» (диффузионный метод) [26]. При этом $\lambda_r = 0$, а источниковый член в уравнении энергии равен:

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

где I_o — интенсивность излучения, оценка которой проводится по уравнению:

$$\frac{1}{k} \left(\frac{\partial^2 I_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial z^2} \right) = 3\chi(I_o - I_b), \quad (4)$$

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

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

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

σ — постоянная излучения абсолютно черного тела;

T — температура.

Вводим условие, что локальный коэффициент излучения и интегральный коэффициент ослабления излучения равны. Тогда локальный интегральный коэффициент ослабления излучения определяется исходя из локальной величины оптической плотности дыма [1]:

$$K = \lambda^* W, \quad (5)$$

где λ^* — коэффициент для пересчета оптического диапазона излучения в инфракрасный;

W — локальная величина оптической плотности дыма, определяемая из решения соответствующего уравнения (8).

Массовая скорость газификации горючей жидкости:

$$\tau \leq \tau_{\text{ст}} / \Psi = \Psi_{\text{уд}} F_{\Gamma} \sqrt{\tau / \tau_{\text{ст}}}; \quad (6)$$

$$\tau > \tau_{\text{ст}} / \Psi = \Psi_{\text{уд}} F_{\Gamma}, \quad (7)$$

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:

$$W = W_{\text{уд}} \Psi. \quad (8)$$

Зона, в которой происходит горение, определяется равномерно распределенными в объеме области горения источниками массы и тепла [1].

Для уравнения (2) задаются следующие граничные условия:

- проекции скоростей на участках внутренних поверхностей ограждающих конструкций равны нулю; для уравнения энергии задаются

граничные условия 3-го рода; для остальных параметров принимается, что $\partial\Phi/\partial n = 0$;

- в области истечения газа наружу на открытом проеме $\partial\Phi/\partial n = 0$,

где n — нормаль к поверхности; области, в которые поступает наружный воздух, основные характеристики воздуха (давление, температура и концентрация компонентов) соответствуют параметрам атмосферного воздуха.

Приведенное ранее уравнение (2) решается с использованием метода контрольных объемов 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. Контроль точности расчетов производится за счет выполнения локального и интегрального законов сохранения массы и энергии в расчетной области.

«Расчет прогрета ограждающих конструкций проводится на основе трехмерных дифференциальных уравнений теплопроводности, решенных совместно с системой уравнений» (2).

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

Более подробно описание математической модели приведено в [23]. Там же представлены результаты сопоставления расчета по предложенной модели с аналитическими решениями, интегральной моделью и экспериментальными данными.

Математическая модель расчета прогрета строительных конструкций

«Для определения распределения температур внутри строительной конструкции в одномерном случае решается уравнение теплопроводности» [1]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (9)$$

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

Уравнение (9) решается численным методом контрольных объемов.

Предполагаем идеальный тепловой контакт между слоями конструкции, изготовленными из различных материалов, что также является наиболее опасным вариантом с точки зрения нагрева конструкции [1].

Граничные условия к уравнению (9) являются граничными условиями 2-го рода. Плотность теплового потока на границах расчетной области определяется из условия:

$$q_{гр} = f(\tau). \quad (10)$$

Плотность теплового потока на внешней (огневой) границе стенки определяется из решения полевой модели.

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 расчета пределов огнестойкости строительных конструкций котельного отделения здания теплоэлектростанции представлены в таблице.

Рассматриваем пожароопасную ситуацию, которая характеризуется наиболее опасным воздействием с точки зрения нагрева несущих металлических конструкций: горение пролива мазута на площади 204 м² на отметке 0,000 в котельном отделении в осях 50–52/Г-Д.

Очаги пожара расположены исходя из возможности наиболее опасного воздействия (на рис. 2).

Наиболее опасному воздействию с точки зрения нагрева подвергаются:

- колонна КА1 с ПТМ $\delta_{пр} = 8,893$ мм, расположенная на оси 66/А;
- фермы L 60×5 с ПТМ $\delta_{пр} = 2,4$ мм, расположенные на отметке +23,950.

Теплофизические свойства стальных конструкций определялись по следующим характеристикам:

- плотность $r = 7800$ кг/м³;
- удельная теплоемкость $c = 470 + 0,21t + 5,0 \cdot 10^{-4}t^2$ Дж/(кг·К);
- коэффициент теплопроводности $\lambda = 58 - 0,042t$ Вт/(м·К),

где t — температура, °С.

Предельная критическая температура стальных конструкций соответствует используемой в нормативной документации и равна $T_{кр} = 500$ °С.

Основные характеристики используемых в помещениях материалов соответствуют используемым в базе пожарной нагрузки [11] — мазут:

- низшая рабочая теплота сгорания $Q_{н}^p = 42,25$ МДж/кг;
- удельная скорость выгорания $\psi_{уд} = 0,035$ кг/(м²·с);

Исходные данные для расчета пределов огнестойкости строительных конструкций котельного отделения здания теплоэлектростанции

Input data for calculating the fire resistance limits of building constructions in the boiler room of the building of a thermal power plant

Здание Building	ТЭЦ Power plant
Основные конструкции Main constructions	Стальные колонны, стальные стропильные фермы, балки покрытия, междуэтажные балки перекрытий Steel columns, steel roof trusses, flooring beams
Каркасно-рамная система Frame system	С жестким защемлением в фундамент с помощью анкерных болтов. В поперечном направлении — многэтажная двухпролетная этажерка, к которой шарнирно примыкают фермы машинного отделения и котельных, в продольном направлении — вертикальными крестовыми связями между колоннами Rigidly anchored into the foundation by anchor bolts. In the transverse direction — a multi-storey two-span bookcase, to which the trusses of the engine room and boiler rooms are hinged, in the longitudinal direction — by vertical cross ties between the columns
Колонны Columns	С шагом 6,5 м Step 6.5 m
Высота до низа стропильных ферм Height to the bottom of roof trusses	21,60 м 21.60 m

- потребление кислорода при горении $L_{O_2} = -3,163$;
- удельное дымовыделение $W_{уд} = 620,1$ 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 [1].

Результаты исследования и их обсуждение

«Для оценки динамики опасных факторов пожара, а также величин пределов огнестойкости строительных конструкций здания использовался специализированный программный комплекс.

На рис. 3–6 представлены характеристики температурного режима пожара и величины фактических пределов огнестойкости несущих металлических конструкций, полученные расчетным путем» [1].

Поля температур (в °С) и скорости (в м/с), оцениваемые в поперечных сечениях помещения, в котором возник пожара, представлены на рис. 2–5.

Координаты y и z направлены вдоль ширины и высоты помещения соответственно.

Максимальные и минимальные температуры колонны с ПТМ $\delta_{пр} = 8,893$ мм и ферм с ПТМ $\delta_{пр} = 2,4$ мм, расположенные на отметках +28,000 и +37,000, определяются из зависимостей, представленных на рис. 6.

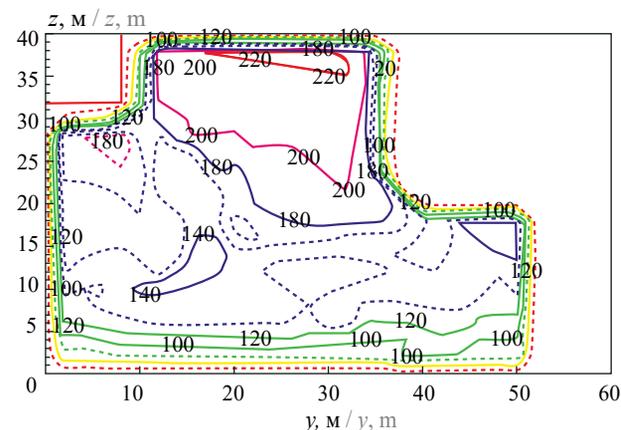


Рис. 2. Поля температур в поперечном сечении котельного отделения, проходящего через источник возгорания, через 5 мин от начала реального пожара

Fig. 2. Temperature fields in the cross section of the boiler room passing through the ignition source, 5 minutes after the start of a real fire

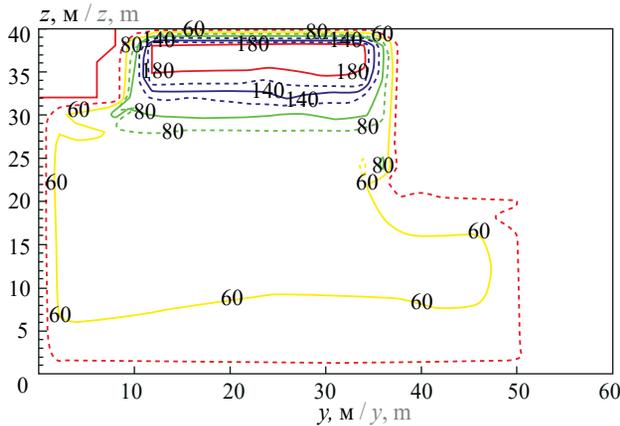


Рис. 3. Поля температур в поперечном сечении котельного отделения, проходящего через источник возгорания, через 15 мин от начала реального пожара

Fig. 3. Temperature fields in the cross section of the boiler room passing through the ignition source, 15 minutes after the start of a real fire

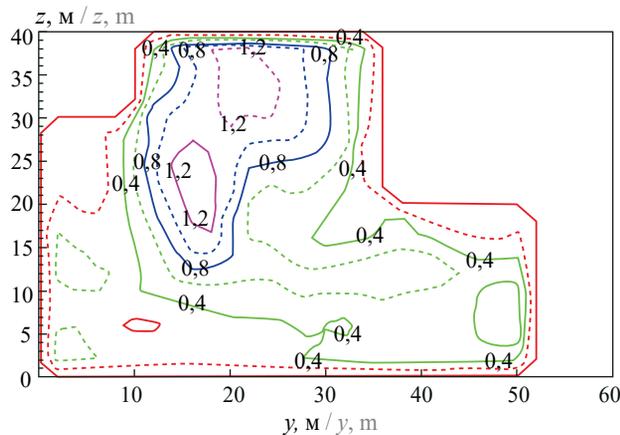


Рис. 4. Поля скоростей в поперечном сечении котельного отделения, проходящего через источник возгорания, через 5 мин от начала реального пожара

Fig. 4. Velocity fields in the cross section of the boiler room passing through the ignition source, 5 minutes after the start of a real fire

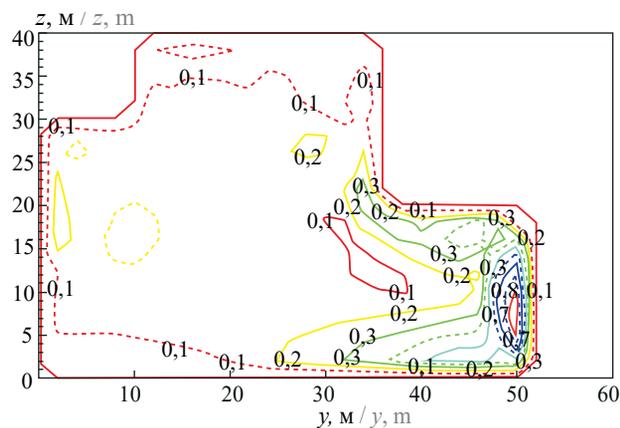


Рис. 5. Поля скоростей в поперечном сечении котельного отделения, проходящего через источник возгорания, через 15 мин от начала реального пожара

Fig. 5. Velocity fields in the cross section of the boiler room passing through the ignition source, 15 minutes after the start of a real fire

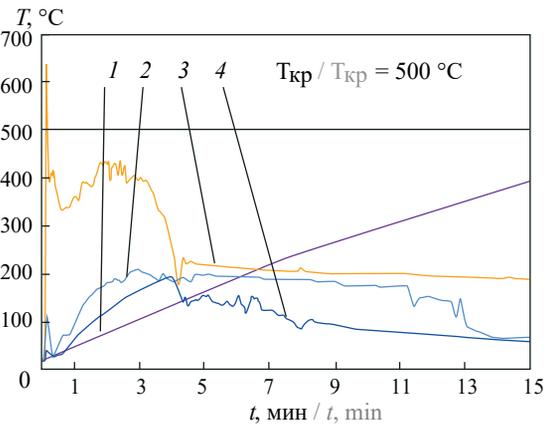


Рис. 6. Зависимости температур в контрольных точках возле стальных конструкций с различной проведенной толщиной металла и на их поверхности от времени при сценарии № 2 развития пожара: 1 — максимальная температура колонны с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 8,893$ мм; 2 — максимальная температура газовой среды вблизи фермы с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 2,4$ мм, расположенной на отметке +28,000; 3 — максимальная температура газовой среды вблизи фермы с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 2,4$ мм, расположенной на отметке +37,000; 4 — максимальная температура газовой среды вблизи фермы с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 2,4$ мм, расположенной на отметке +17,000

Fig. 6. Dependence of temperatures at control points near steel structures with different metal thicknesses and on their surface on time in scenario No. 2 of fire development: 1 — the maximum temperature of the column with the reduced thickness $\delta_{red} = 8.893$ mm; 2 — the maximum temperature of the gaseous environment near the farm with the reduced thickness $\delta_{red} = 2.4$ mm, located at +28,000; 3 — the maximum temperature of the gaseous environment near the farm with the reduced thickness $\delta_{red} = 2.4$ mm, located at +37,000; 4 — the maximum temperature of the gaseous medium near the farm with the reduced thickness $\delta_{red} = 2.4$ mm, located at +17,000

На основании проведенных расчетов видно, что спустя 15 мин от начала пожара не достигается критическая температура прогрева металлической конструкции, равная 500 °С. Исходя из этого можно заключить, что для металлических конструкций, расположенных в отделении котельной, проведение работ по огнезащитной обработке не требуется.

Выводы

На основе вышеописанных результатов по оценке предела огнестойкости металлических конструктивных элементов теплоэлектроцентралей можно сделать вывод: в случае возникновения пожара с наиболее опасным сценарием его развития пределы огнестойкости несущих конструктивных элементов выше R15, которые необходимы в соответствии с требованиями нормативных документов. Из этого следует, что огнезащита данных конструктивных элементов не требуется.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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
2. Скрипник И.Л., Бекишова Е.А. Анализ аварийных ситуаций на ТЭЦ и предложения по их снижению // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения : мат. Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 14 апреля 2020 г. СПб., 2020. С. 84–86. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44358546>
3. Скрипник И.Л., Воронин С.В. Анализ пожарной опасности технологических систем по показателям надежности // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2017. № 3. С. 33–37. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34903361>
4. Реценко А.Л., Дроздова Т.И. Анализ критического времени развития пожара и времени эвакуации работников ремонтного цеха автохозяйства МКУ «ТЭС» города Иркутска // Техносферная безопасность в XXI веке : мат. XI Всеросс. науч.-практ. конф. маг., асп. и мол. ученых. Иркутск, 1–3 декабря 2021 г. Иркутск, 2021. С. 189–195. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47349448>
5. Белов В.В., Пергаменичик Б.К. Прогнозирование ущерба от возможных чрезвычайных ситуаций с учетом пожара в главных корпусах ТЭС // Пожаровзрывобезопасность. 2016. Т. 25. № 8. С. 42–48. DOI 10.18322/PVB.2016.25.08.42-48
6. Bovsunovskii A.P., Chernousenko O.Yu., Shtefan E.V., Bashta D.A. Fatigue damage and failure of steam turbine rotors by torsional vibrations // Strength of Materials. 2010. Vol. 42. Issue 1. Pp. 108–113. DOI: 10.1007/s11223-010-9196-2
7. Шебеко Ю.Н., Зубань А.В., Шебеко А.Ю. Расчет фактического предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций при различных температурных режимах пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 6. С. 29–34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.29-34
8. Симонова М.А., Романов Н.Н., Пермяков А.А. Расчет температурных полей несущих металлических конструкций в условиях высокотемпературного воздействия для оценки огнестойкости // Вестник Международной академии холода. 2021. № 2. С. 88–97. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-88-97
9. Coile R., Balomenos G., Pandey M.D., Caspee R. An unbiased method for probabilistic fire safety engineering, requiring a limited number of model evaluations // Fire Technology. 2017. Vol. 53. Issue 1. Pp. 1–40. DOI: 10.1007/s10694-017-0660-4
10. Салумяги И.В., Асламова В.С. Методы оценки пожарного риска // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2017. Т. 1. С. 312–317.
11. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учеб. пособие. М. : Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.
12. Командышко В.О. Методы оценки пожарного риска // Студенческий. 2022. № 17-6 (187). С. 19–22.
13. Недрышкин О.В., Гравит М.В. Программные комплексы моделирования опасных факторов пожара // Пожарная безопасность. 2018. № 2. С. 38–46. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35102012>
14. Li S., Tao G., Zhang L. Fire risk assessment of high-rise buildings based on gray-FAHP mathematical model // Procedia Engineering. 2018. Vol. 211. Pp. 395–402. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.028
15. McGrattan K., Forney G. Fire dynamics simulator. User's Guide. National Institute of Standards and Technology Special Publication 1019. 2005. P. 90.
16. Бедрина Е.А., Рекин А.С., Храпский С.Ф. Прогнозирование динамики тепломассообменных процессов при пожарах в типовых многоэтажных жилых зданиях // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7. № 3. С. 10–15. DOI: 10.25206/2310-9793-7-3-10-15
17. Храпский С.Ф., Бедрина Е.А. Динамика развития тепломассообменных процессов при пожарах в жилых многоквартирных зданиях и ее влияние на возможность безопасной эвакуации людей // Динамика систем, механизмов и машин. 2020. Т. 8. № 3. С. 124–131. DOI: 10.25206/2310-9793-8-3-124-131
18. Nimlyat P.S., Audu A.U., Ola-Adisa E.O., Gwatau D. An evaluation of fire safety measures in high-rise buildings in Nigeria // Sustainable Cities and Society. 2017. Vol. 35. Pp. 774–785. DOI: 10.1016/j.scs.2017.08.035
19. Qi D., Wang L., Zhao G. Froude-Stanton modeling of heat and mass transfer in large vertical spaces of highrise buildings // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 115. Pp. 706–716. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.030
20. Qi D., Wang L., Zmeureanu R. An analytical model of heat and mass transfer through non-adiabatic high-rise shafts during fires // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 72. Pp. 585–594. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.042
21. Ahn C.S., Bang B.H., Kim M.W., James S.C., Yarin A.L., Yoon S.S. Theoretical, numerical, and experimental investigation of smoke dynamics in high-rise buildings // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 135. Pp. 604–613.
22. Tan S., Moinuddin K. Systematic review of human and organizational risks for probabilistic risk analy-

- sis in high-rise buildings // *Reliability Engineering & System Safety*. 2019. Vol. 188. Pp. 233–250. DOI: 10.1016/j.res.2019.03.012
23. 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.
24. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М., 1984.
25. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М. : Наука, 1987. 840 с.
26. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations // *Monthly Weather Review*. 1963. Vol. 91. Pp. 99–164. DOI: 10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWT-P>2.3.CO;2
27. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М. : Атомиздат, 1979. 416 с.

REFERENCES

- 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. (rus).
- Skrypnyk I.L., Bekishova E.A. Analysis of emergency situations at chp and proposals for their reduction. Fire safety: modern challenges. *Problems and solutions : Materials of the International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, 14 April 2020*. St. Petersburg, 2020; 84-86. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44358546> (rus).
- Skrypnyk I.L., Voronin S.V. Analysis of the fire danger of technological systems by reliability indicators. *Scientific and analytical journal. Supervisory activities and forensic expertise in the security system*. 2017; 3:33-37. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34903361> (rus).
- Reshchenko A.L., Drozdova T.I. Analysis of the critical time of the fire development and the evacuation time of the workers of the repair shop of the automobile farm MCU “TES” of Irkutsk. *Technosphere safety in XXI century: Materials of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference of Undergraduates, Graduate Students and Young Scientists. Irkutsk, December 1–3, 2021*. Irkutsk, 2021; 189-195. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47349448> (rus).
- Belov V.V., Pergamenschchik B.K. Forecasting of damage from possible emergencies, given the fire in the main building thermal power plants. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(8): 42-48. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.08.42-48 (rus).
- Bovsunovskii A.P., Chernousenko O.Yu., Shtefan E.V., Bashta D.A. Fatigue damage and failure of steam turbine rotors by torsional vibrations. *Strength of Materials*. 2010; 42(1):108-113. DOI: 10.1007/s11223-010-9196-2
- Shebeko U.N., Zuban A.A., Shebeko A.Yu. An evaluation of an actual fire resistance limit of non-protected steel structures for different temperature regimes of fires. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(6):29-34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.29-34 (rus).
- Simonova M.A., Romanov N.A., Permyakov A.A. Method of engineering calculation of the fire resistance limit for load-bearing metal structures. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021; 2:88-97. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-88-97 (rus).
- Coile R., Balomenos G., Pandey M.D., Caspeelee R. An unbiased method for probabilistic fire safety engineering, requiring a limited number of model evaluations. *Fire Technology*. 2017; 53(1):1-40. DOI: 10.1007/s10694-017-0660-4
- Salumyagi I.V., Aslamova V.S. Methods of evaluation of the fire risk. *Transport Infrastructure of the Siberian Region*. 2017; 1:312-317. (rus).
- Koshmarov U.A. *Prediction of indoor fire hazards*. Moscow, Fire Fighting Service of State Academy of Emercom of Russia, 2000; 118. (rus).
- Komandyshko V.O. Methods of fire risk assessment. *Student*. 2022; 17-6(187):19-22. (rus).
- Nedryshkin O.V., Gravit M.Q. Software complexes for modeling of dangerous fire factors. *Pozharnaya bezopasnost/Fire safety*. 2018; 2:38-46. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35102012> (rus).
- Li S., Tao G., Zhang L. Fire Risk assessment of high-rise buildings based on gray-FAHP mathematical model. *Procedia Engineering*. 2018; 211:395-402. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.028
- McGrattan K., Forney G. *User's Guide. National Institute of Standards and Technology Special Publication 1019*. 2005; 90.
- Bedrina E.A., Rekin A.S., Khrapsky S.F., Bokarev A.I., Denisova E.S. Heat-mass exchange processes dynamics forecasting in fires in typical multistorey apartment buildings. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2019; 7(3):10-15. DOI: 10.25206/2310-9793-7-3-10-15 (rus).
- Khrapsky S.F., Bedrina E.A. Heat-mass exchange processes dynamics in fires in multi-apartment buildings and its impact on safe people evacuation probability. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2020; 8(3):124-131. DOI: 10.25206/2310-9793-8-3-124-131 (rus).
- Nimlyat P.S., Audu A.U., Ola-Adisa E.O., Gwatau D. An evaluation of fire safety measures in high-rise buildings in Nigeria. *Sustainable Cities and Society*. 2017; 35:774-785. DOI: 10.1016/j.scs.2017.08.035
- Qi D., Wang L., Zhao G. Froude-Stanton modeling of heat and mass transfer in large vertical spaces

- of highrise buildings. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017; 115:706-716.
20. Qi D., Wang L., Zmeureanu R. An analytical model of heat and mass transfer through non-adiabatic high-rise shafts during fires. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014; 72:585-594. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.042
 21. Ahn C.S., Bang B.H., Kim M.W., James S.C., Yarin A.L., Yoon S.S. Theoretical, numerical, and experimental investigation of smoke dynamics in high-rise buildings. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019; 135:604-613.
 22. Tan S., Moinuddin K. Systematic review of human and organizational risks for probabilistic risk analysis in high-rise buildings. *Reliability Engineering & System Safety*. 2019; 188:233-250. DOI: 10.1016/j.ress.2019.03.012
 23. Puzach S. *Methods of calculating heat and mass transfer in case of fire in the room and their application in solving practical problems of fire and explosion safety*. Moscow, Fire Fighting Service of State Academy of Emercom of Russia, 2005; 336. (rus).
 24. Patankar S. *Numerical methods of solving problems of heat transfer and fluid dynamics*. Moscow, 1984. (rus).
 25. Loitsyanskii L.G. *Mekhanika lizhdina i gaza*. Moscow, Nauka Publ., 1987; 840. (rus).
 26. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. *Monthly Weather Review*. 1963; 91:99-164 DOI: 10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2
 27. Kutateladze S.S. *Fundamentals of the theory of heat transfer*. Moscow, Avtomirizdat Publ., 1979; 416. (rus).

*Поступила 26.08.2022, после доработки 20.09.2022;
принята к публикации 30.09.2022*

Received August 26, 2022; Received in revised form September 20, 2022;

Accepted September 30, 2022

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; Scopus Author ID: 56893573700; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

ПОРТНОВ Федор Александрович, к-т техн. наук, доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 1134480; Scopus Author ID: 57192372795; ORCID: 0000-0001-7409-0844; e-mail: f.portnov@ikbs-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 Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 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 Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 274777; Scopus Author ID: 56893573700; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

Fedor A. PORTNOV, Cand. Sci. (Eng.), Associated Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1134480; Scopus Author ID: 57192372795; ORCID: 0000-0001-7409-0844; e-mail: f.portnov@ikbs-mgsu.ru

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.