
ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКОНОМИКА

DOI 10.15826/rjst.2022.1.001

УДК 614.841.332

Мостовских Д. С.¹, Беляева З. В.²

¹ГК «Эффективное проектирование», Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

e-mail: ¹darya.mostovskikh@gmail.com, ²z.v.believa@urfu.ru

РАСЧЕТ ОГНЕСТОЙКОСТИ НЕСТАНДАРТНЫХ СЕЧЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS

Аннотация. В работе рассмотрены основные элементы монолитных железобетонных конструкций: плиты, балки и колонны, для которых исследовано поведение под воздействием температуры стандартного пожара. В качестве примера взяты конструкции Международного Медицинского Центра по адресу г. Москва, Западный округ, территория Инновационного Центра «Сколково». Расчет конструкций производился в программном комплексе Ansys Workbench. По результатам теплотехнического расчета построены графики распределения температуры по высоте сечения элементов в зависимости от времени нагрева и предложена оценка огнестойкости на основе критерия потери теплоизолирующих свойств.

Ключевые слова: теплотехнический расчет, железобетонные конструкции, огнестойкость, воздействие стандартного пожара, конструкции Международного медицинского центра (ММЦ) на территории Инновационного центра «Сколково», ANSYS Workbench.

Mostovskikh D. S.¹, Belyaeva Z. V.²

¹«Effective design», Yekaterinburg, Russia

²Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

e-mail: ¹darya.mostovskikh@gmail.com, ²z.v.believa@urfu.ru

CALCULATING FIRE RESISTANCE OF NON-STANDARD CROSS- SECTIONS OF ELEMENTS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES USING THE ANSYS SOFTWARE COMPLEX

Abstract. The article considers main elements of cast-in-place reinforced concrete structures: slabs, beams and columns. Their behavior under temperature conditions of a standard fire has been studied. As an example structures of the International Medical Center in Moscow, Western District, the territory of the Innovation Center "Skolkovo" were considered. The software ANSYS Workbench was used for calculation of structures. According to the results of the thermo technical calculation, graphs of temperature distribution over the section height of the elements as a function of heating time are plotted and an assessment of fire resistance based on the criterion of loss of heat-insulating properties is proposed.

Keywords: thermo technical calculation, reinforced concrete structures, fire resistance, exposure of standard fire, constructions of International Medical Center (IMC) on the territory of Skolkovo Innovation Center, ANSYS Workbench.

1. Введение

Возникновение пожара всегда связано с большим ущербом, причиненным жизни и имуществу. Статистика пожаров в России отражает текущее состояние процессов обеспечения пожарной безопасности в стране. Зачастую многие люди погибают в результате обрушения несущих конструкций здания. По данным МЧС [1] на пожары, возникшие в зданиях и сооружениях, приходится максимальное число погибших — около 95% от всех погибших по России. Поэтому большая роль отводится капитальному строительству, улучшению его качества, которое характеризуется также надежностью работы строительных конструкций в условиях возможного пожара, т. е. их огнестойкостью. При проектировании зданий и сооружений применяются различные конструкции и материалы, которые должны обладать заданными противопожарными характеристиками. Данное требование обеспечения сохранности конструкций и их прочностных свойств при воздействии

пожара является обязательным в соответствии с Техническим регламентом о требованиях пожарной безопасности [2].

На рисунках 1-2 приведены общие тенденции и динамика числа пожаров, ущерба, гибели людей в период с 2016 по 2020 гг.

На сегодняшний день благодаря своим преимуществам железобетон является основным строительным материалом для всех типов сооружений. Понимание основ поведения такого материала при нагружении, термическом воздействии и влиянии окружающей среды позволяет создавать более эффективные и безопасные формы элементов, осуществлять прогнозирование эксплуатационных свойств и проводить оптимизации конструкции на основе заданных критериев. Вопросы расчета железобетонных конструкций на воздействие нагрева при пожаре исследуются российскими и зарубежными учеными уже не одно десятилетие [3-19].

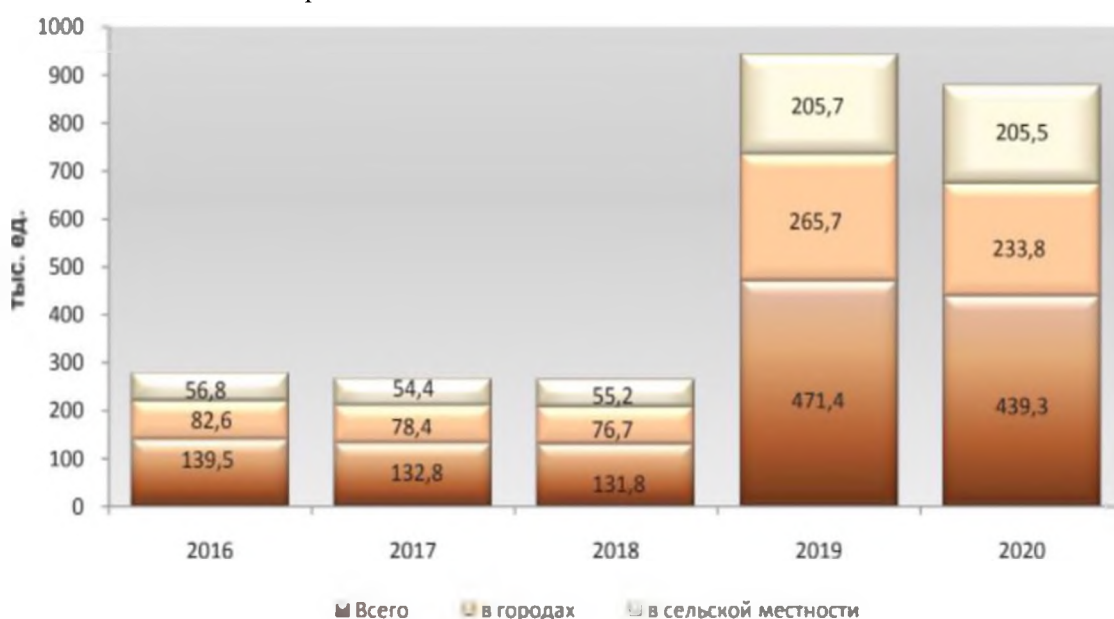


Рис. 1. Количество пожаров в период с 2016 по 2020 гг. [1]



Рис. 2. Численность погибших при пожарах в период с 2016 по 2020 гг. [1]

Решение задачи нестационарной теплопроводности сводится к определению температуры по сечению конструкции в процессе воздействия на нее стандартного температурного режима. Изменение температуры в твердых телах рассчитывают путем решения дифференциального уравнения теплопроводности Фурье при нелинейных граничных условиях и сложном процессе тепло – и массопереноса. Для плит перекрытий, колонн и балок принимаем, что температура в конструкции изменяется только по поперечному сечению элементов, так как один размер конструкции значительно больше или меньше двух других. Тогда температурное поле у таких конструкций является двухмерным и выражается уравнением Фурье [20]:

$$c_t \gamma_t \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_t \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_t \frac{\partial t}{\partial y} \right],$$

где c_t – удельная теплоемкость бетона в зависимости от температуры, Дж/(м · °С);

γ_t – удельный вес бетона, кг/м³;

t – температура, °С;

τ – время, сек;

λ_t – коэффициент теплопроводности бетона в зависимости от его температуры, Дж/(м · °С · с)

Однако данная постановка задачи нестационарной теплопроводности сложна для повседневной инженерной

практики, проблематика которой достаточно полно описана в литературе [21]. С целью упрощения решения разработаны различные методы, в которых не рассматривается целый ряд практических задач, что ограничивает область их применения.

Модели из объемных элементов позволяют получить наиболее полные данные о напряженно-деформированном состоянии железобетонной конструкции. С целью снижения трудоемкости и повышения эффективности проведения анализа используется метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет анализировать сложные системы с многообразием взаимосвязей между элементами внутри модели и внешним воздействием окружающей среды. В данной работе были выполнены теплотехнические расчеты железобетонных конструкций в программной среде Ansys Workbench, как одной из наиболее совершенной и наиболее известной в области расчета конструкций из нелинейно работающих материалов.

2. Теплотехнические расчеты

Огнестойкость железобетонных конструкций утрачивается, как правило, в результате потери несущей способности (обрушения) за счет снижения прочности, теплового

расширения и температурной ползучести арматуры и бетона при нагревании.

В общем случае расчет состоит из двух частей: теплотехнической и статической. Воздействие «стандартного пожара» на конструкцию задается граничным условием 3-го рода, которое характеризуется изменением

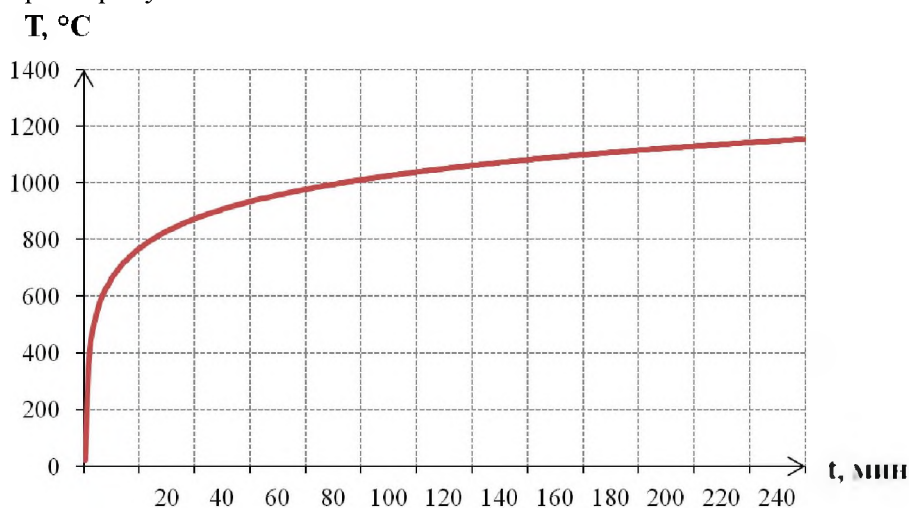


Рис. 3. Стандартная температурная кривая газовой среды в условиях пожара при начальной температуре $t = 22^\circ\text{C}$ (авторская схема)

Полный тепловой поток к обогреваемой поверхности со стороны внешней тепловой нагрузки осуществляется по двум механизмам [22]:

$$q_f = q_{kf} + q_{lf},$$

где q_{kf} – тепловой поток за счет конвективного теплообмена,

q_{lf} – тепловой поток за счет излучения,

Конвективная составляющая полного теплового потока к обогреваемой поверхности конструкции рассчитывается по закону Ньютона:

$$q_{kf} = \alpha_f (T_f - T_w),$$

где α_f – коэффициент конвективного теплообмена между газовой средой и обогреваемой поверхностью конструкции: $\alpha_f = 29 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$;

T_f – температура газовой среды;

T_w – температура обогреваемой поверхности.

температуры во времени согласно уравнению (рис. 3) [20]:

$$t = t_0 + 345 \lg(0,133\tau + 1),$$

где t – температура пожара, $^\circ\text{C}$;

t_0 – температура окружающей среды (начальная температура пожара), принимаем $t_0 = 22^\circ\text{C}$;

τ – продолжительность пожара, сек.

На стадии развитого пожара в случае оптически плотной газовой среды плотность результирующего потока излучения к поверхности конструкции в зависимости от локальной температуры среды в окрестности рассматриваемого элемента поверхности рассчитывается по формуле:

$$q_{lf} = A_f \sigma (T_f^4 - T_w^4),$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$;

A_f – приведенная степень черноты газовой среды и поверхности:

$$A_f = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_f} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,85} + \frac{1}{0,85} - 1\right)} = 0,739;$$

ε_f – интегральный коэффициент излучения газовой среды, $\varepsilon_f = 0,85$;

ε_w – интегральный коэффициент излучения поверхности, для бетона $\varepsilon_w = 0,85$;

T_f – локальная температура в окрестности рассматриваемого элемента поверхности (на внешней границе теплового пограничного слоя).

Рассмотрим особенности теплотехнического расчета на примере конструкций ММЦ в «Сколково»: монолитных железобетонных плит, балок и колонн. Задачу нестационарной теплопроводности решим в модуле Transient Thermal в пакете Ansys Workbench.

2.1. Монолитная железобетонная плита перекрытия

Перекрытия ММЦ представляет собой монолитную железобетонную плиту толщиной 240 мм с капителями в зоне колонн и с сеткой осей (пролетом) 7,8×7,8 м. Основные параметры плиты представлены в таблице 1. Размер сетки конечных элементов для плиты принят 50 мм. Общий вид плиты перекрытия в виде конструктивных и конечных элементов показан на рисунках 4 и 5 соответственно.

Таблица 1

Параметры плиты перекрытия

№ п/п	Параметр	Значение
1	Материал плиты, бетон	B35
2	Толщина плиты (t), мм	240
3	Пролет (L), мм	7800
4	Расчетная ширина плиты (b), мм	7800
5	Фоновое верхнее, нижнее армирование плиты: диаметр арматуры, мм шаг арматуры, мм класс арматуры	12 200 A500C
6	Расстояние от нижней грани до центра сечения арматуры (a), мм	30
7	Толщина защитного слоя бетона, мм	24

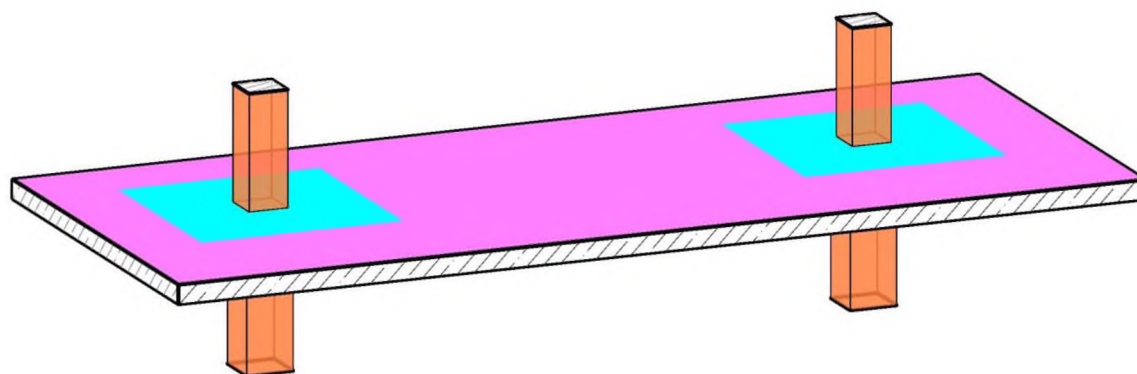


Рис. 4. Общий 3D вид плиты перекрытия в виде конструктивных элементов

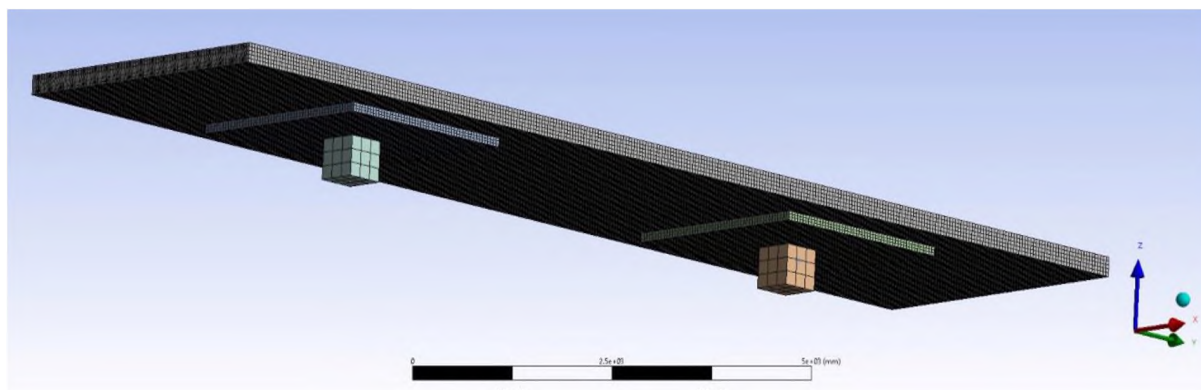


Рис. 5. Общий 3D вид плиты перекрытия в виде конечных элементов

Нагрев плиты осуществляется равномерно по всей длине со стороны нижней поверхности, температура которой соответствует температуре стандартного пожара. В модельной задаче плиту нагревали в течение 200 минут. Минимальный предел огнестойкости плиты перекрытия должен быть не менее 120 минут (120REI) согласно [2]. В результате расчета для любого момента времени нагрева были получены температурные поля в сечении плиты (рис. 6).

Для плиты толщиной 240 мм температура в точках сечения по высоте на всем интервале времени нагрева представлена на рис. 7. Значение температуры на обогреваемой поверхности плиты (линия 0 мм) изменяется согласно воздействию стандартного пожара. Линия, обозначаемая 240 мм, на графике соответствует не обогреваемой поверхности плиты перекрытия.

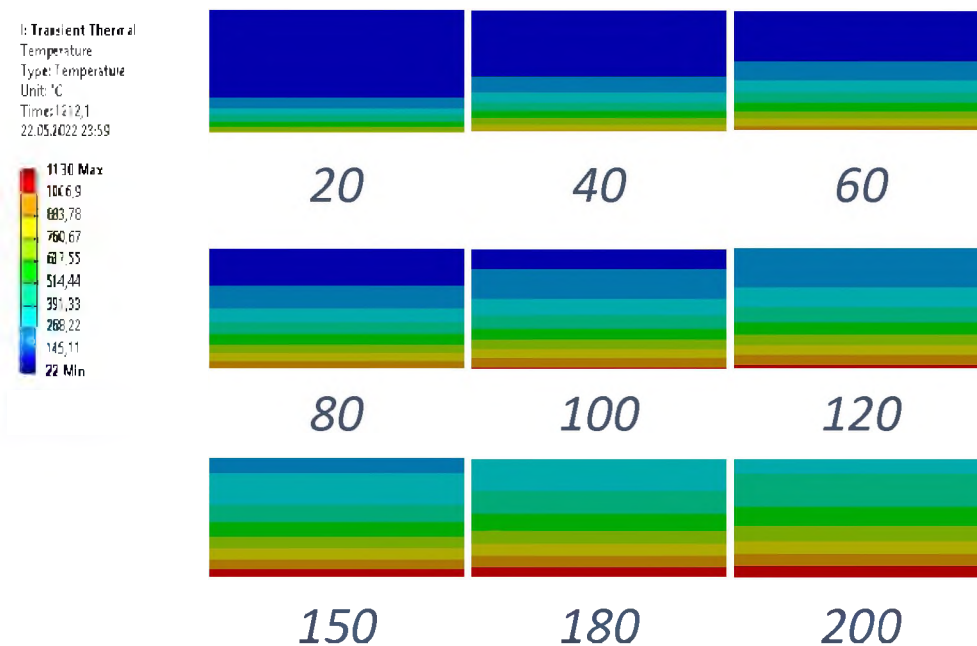


Рис. 6. Температурные поля в сечении плиты перекрытия при 20, 40, 60, 80, 100, 120, 150, 180 и 200 минутах нагрева

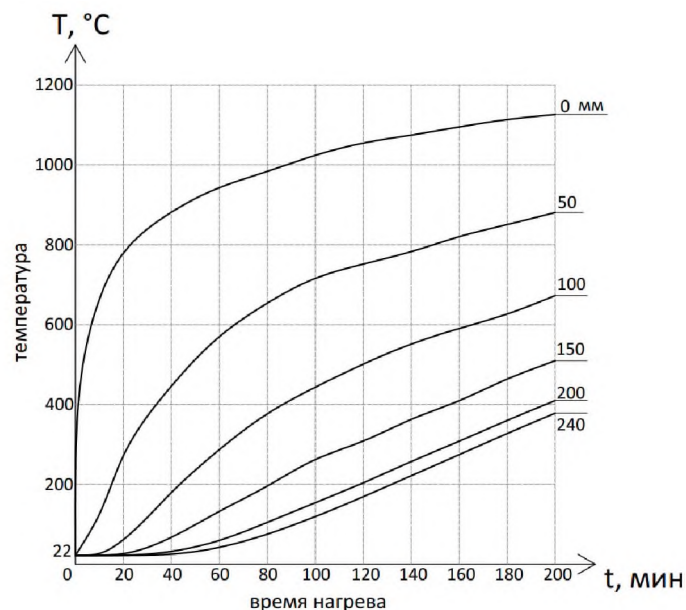


Рис. 7. Зависимость температуры в точках, расположенных по высоте сечения от времени нагрева

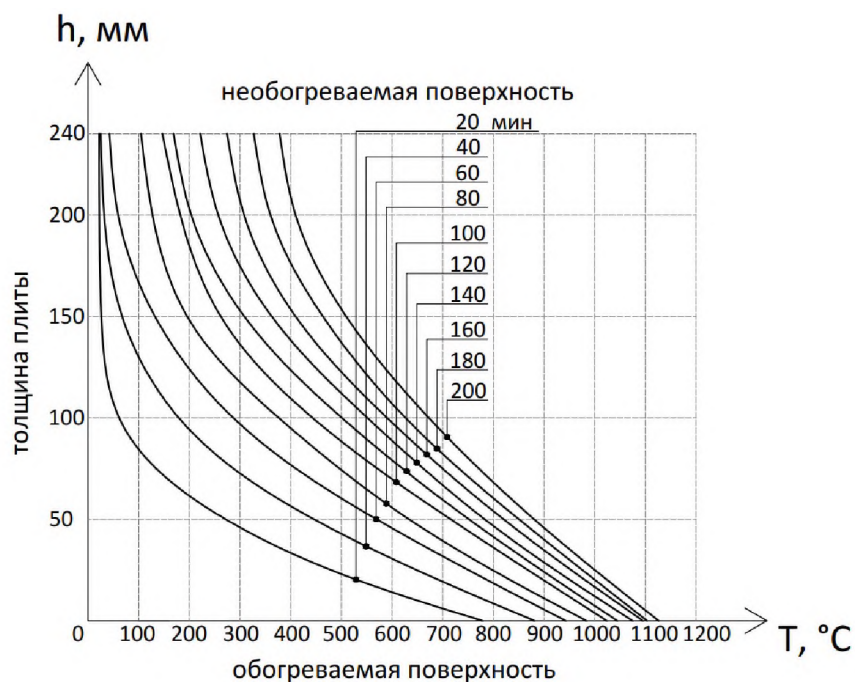


Рис. 8. Распределение температуры по высоте сечения в зависимости от времени нагрева

Данные по температурным полям в плите, а именно график распределения температуры по высоте сечения в зависимости от времени нагрева (рис. 8), позволяют дать оценку огнестойкости плиты по потере теплоизолирующей способности. При повышении температуры на необогреваемой поверхности до 160°C

наступает предел огнестойкости конструкции по потере теплоизолирующей способности [23]. Исходя из графика видно, что потеря теплоизолирующих свойств плиты происходит на 120 минуте пожара, что не меньше предела огнестойкости (120I).

2.2. Монолитная железобетонная балка

Данная балка является одним из самых важных несущих элементов в медицинском центре, так как в середину ее пролета приходит колонна от вышележащих этажей.

Сечение балки 2200x1000 мм, пролет 15,6 м, нижнее армирование представлено 5-ю рядами. Параметры балки представлены в таблице 2. Общий вид балки в виде конструктивных и конечных элементов показан на рис. 9 и 10 соответственно.

Таблица 2

Параметры балки

№ п/п	Параметр	Значение
1	Материал балки, бетон	B35
2	Геометрические параметры балки:	
	– высота (h), мм	2200
	– ширина (b), мм	1000
	– свес полки (l_1), мм	1000
3	Пролет (L), мм	15600
4	Верхнее армирование балки:	
	– диаметр арматуры, мм	32
	– количество в одном ряду, шт.	10
	– число рядов, шт.	2
	– класс арматуры	A500C
5	Промежуточное армирование балки:	
	– диаметр арматуры, мм	32
	– количество в одном ряду, шт.	6
	– число рядов, шт.	3
	– класс арматуры	A500C
6	Нижнее армирование балки:	
	– диаметр арматуры, мм	40
	– количество в одном ряду, шт.	10
	– число рядов, шт.	5
	– класс арматуры	A500C
7	Поперечное армирование балки:	
	– диаметр хомутов, мм	16
	– шаг хомутов, мм	200
	– количество хомутов в сечении, шт.	3
	– класс арматуры	A500C
8	Расстояние от нижней грани до центра сечения арматуры (a), мм	70
9	Толщина защитного слоя бетона, мм	50

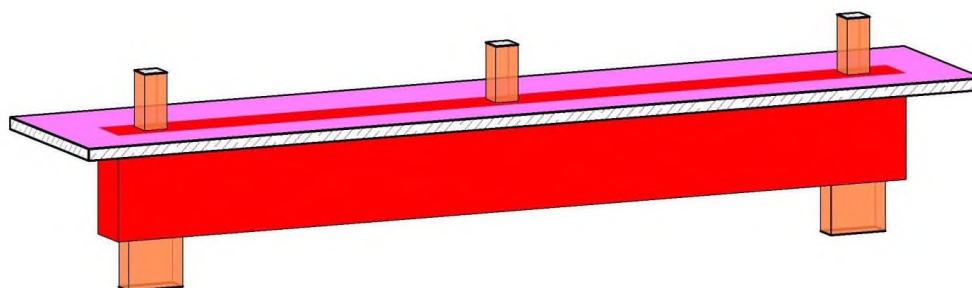


Рис. 9. Общий 3D вид балки в виде конструктивных элементов

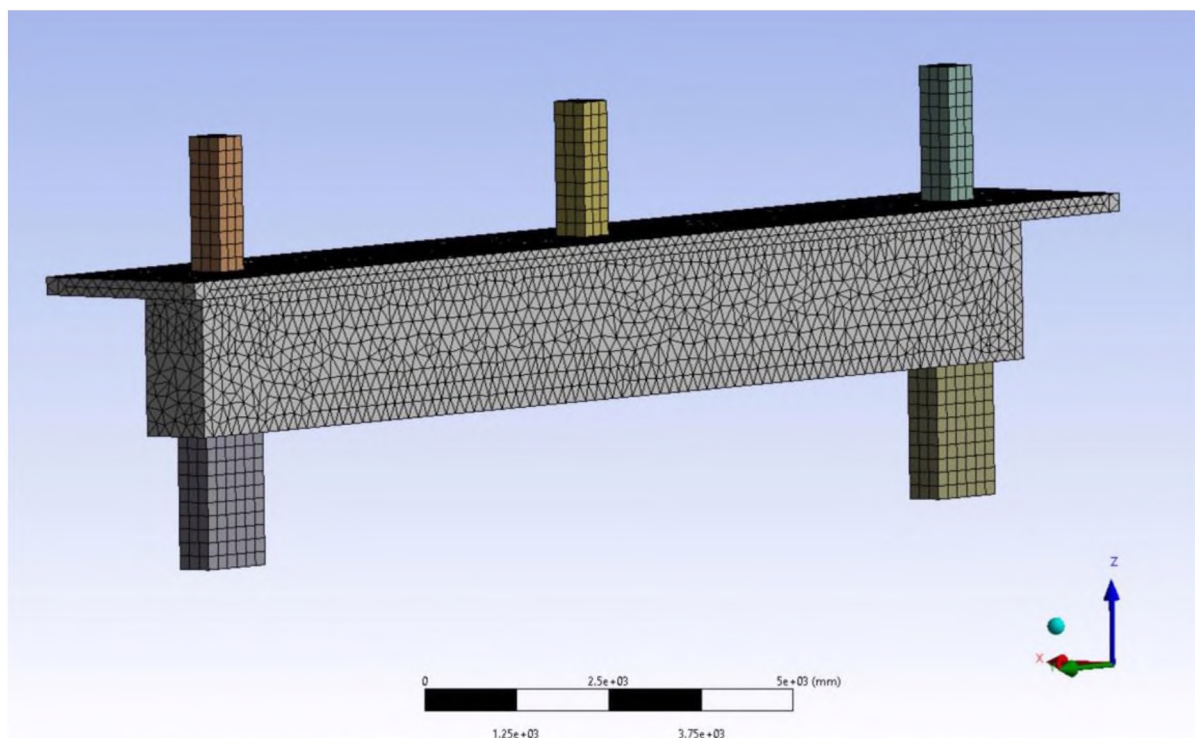


Рис. 10. Общий 3D вид балки в виде конечных элементов

Теплотехнический расчет для монолитной железобетонной балки производился по такому же принципу, как и для плиты перекрытия. Отличие состоит в том, что нагрев балки осуществляется равномерно по всей длине со стороны 3-х сторон: нижней и двух боковых поверхностей. В модельной задаче балку нагревали в течение 200 минут. Размер сетки конечных элементов для балки также принят 50 мм.

Рассмотрим температурные поля в балке при разных временах нагрева. На рис. 11 показаны поперечные сечения балки, которые разделены вертикальной осевой линией пополам, так чтобы можно было сопоставить температурные поля при различных временах нагрева.

По рис. 13 можно предположить, что огнестойкость балки будет утрачена вследствие потери несущей способности, а не теплоизолирующей

способности, так как сечение балки является массивным.

2.3 Монолитная железобетонная колонна

Аналогичным образом определим температурные поля для колонны при ее четырехстороннем нагреве с помощью теплового воздействия стандартного пожара. Геометрия колонны представляет изменяющееся по высоте сечение. Параметры колонны представлены в таблице 3. Общий вид колонны в виде конструктивных и конечных элементов показан на рис. 14.

На рис. 15 показаны нижнее, среднее и верхнее поперечные сечения колонны, разделенные осевой линией пополам. На рис. 16 аналогично показаны продольные сечения колонны. Очевидно, что наиболее опасным является нижнее сечение колонны, как с точки зрения прогрева, так и с точки зрения прочностного анализа.

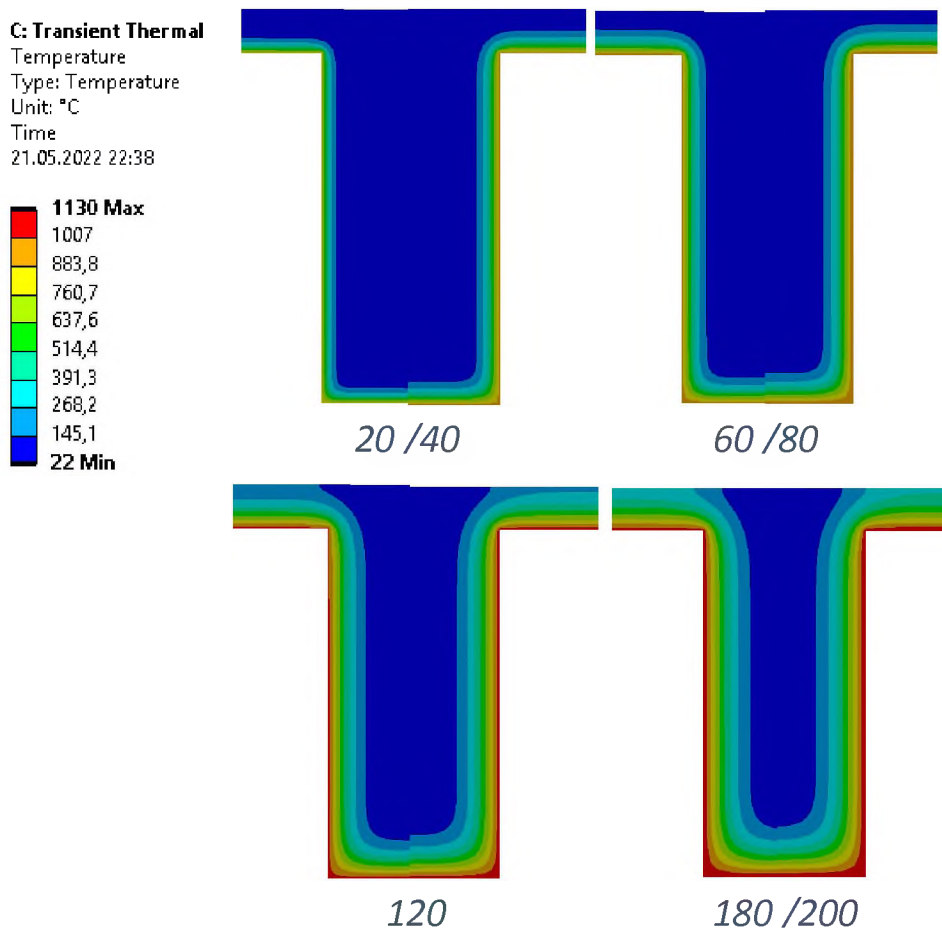


Рис. 11. Температурные поля в сечении балки при 20, 40, 60, 80, 120, 150, 180 и 200 минутах нагрева

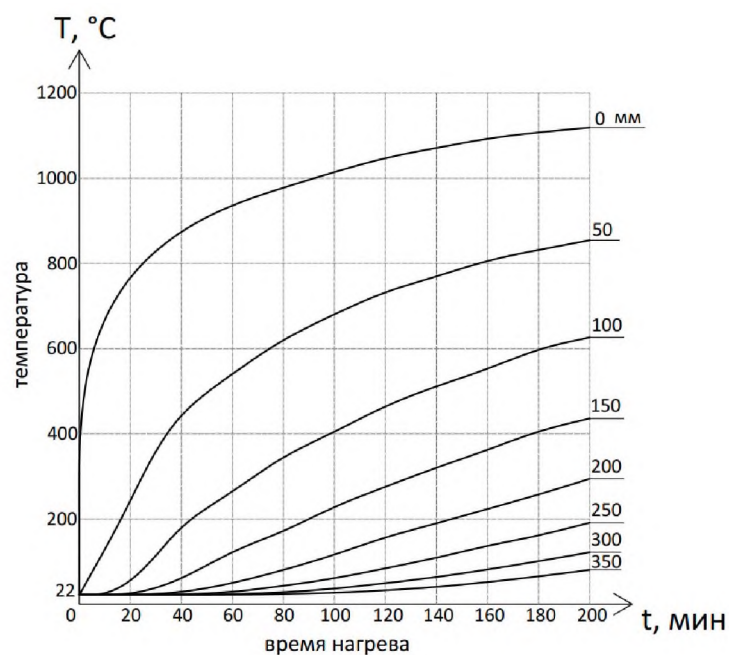


Рис. 12. Зависимость температуры в точках, расположенных по ширине сечения от времени нагрева

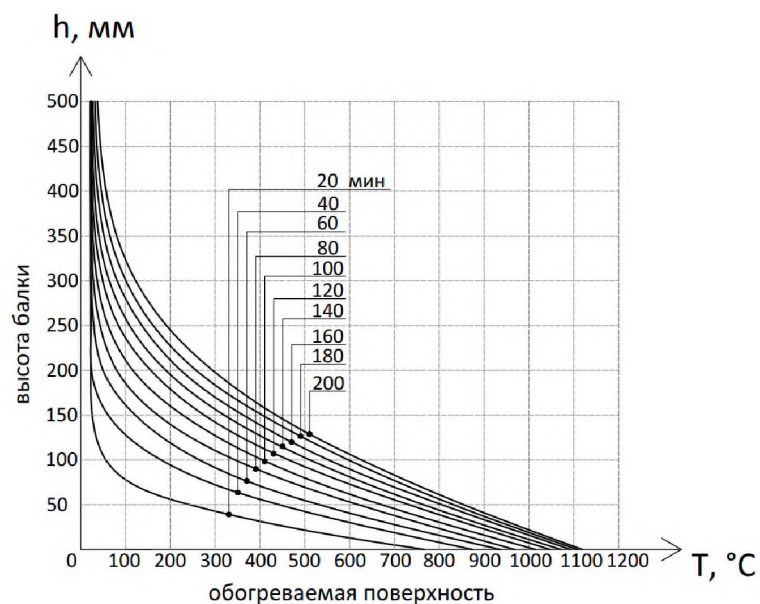


Рис. 13. Распределение температуры по ширине сечения в зависимости от времени нагрева

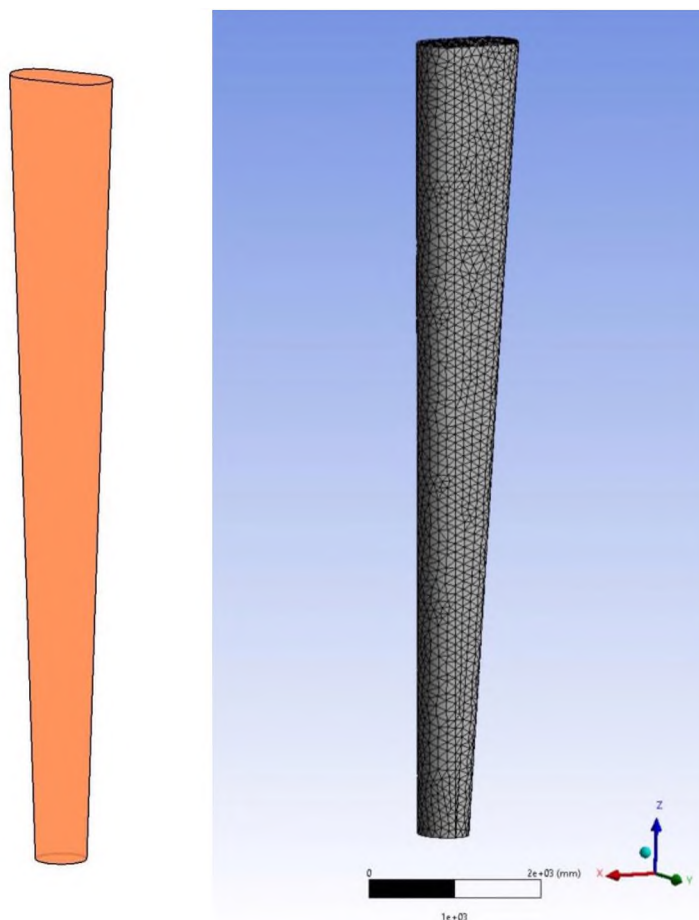


Рис. 14. Общий 3D вид колонны в виде конструктивных и конечных элементов соответственно

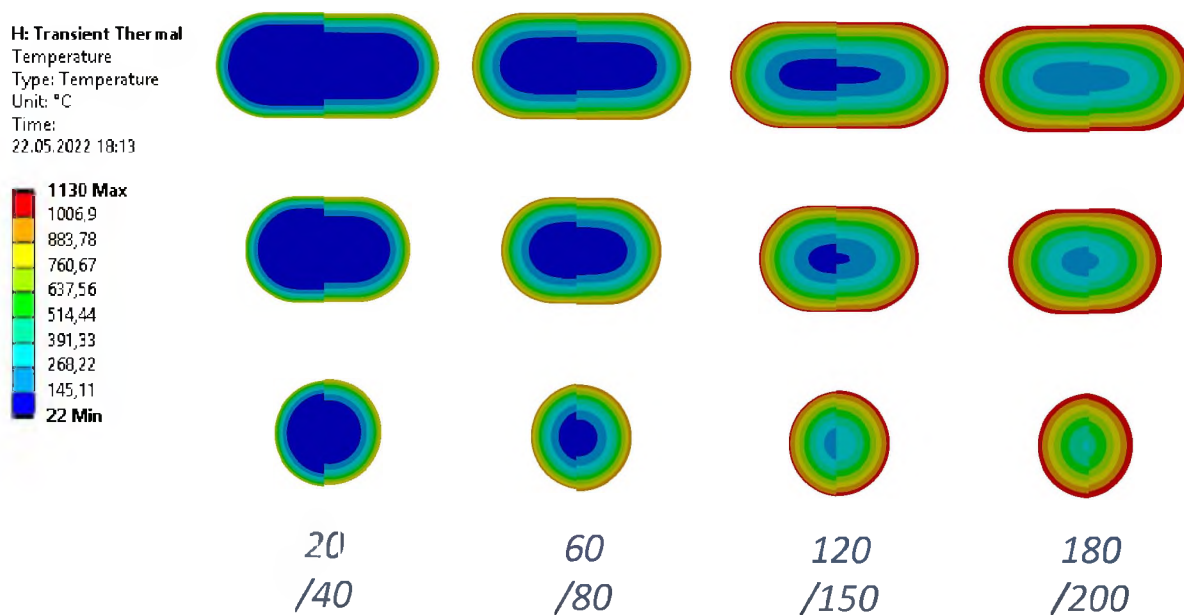


Рис. 15. Температурные поля в поперечном сечении колонны при 20, 40, 60, 80, 120, 150, 180 и 200 минутах нагрева

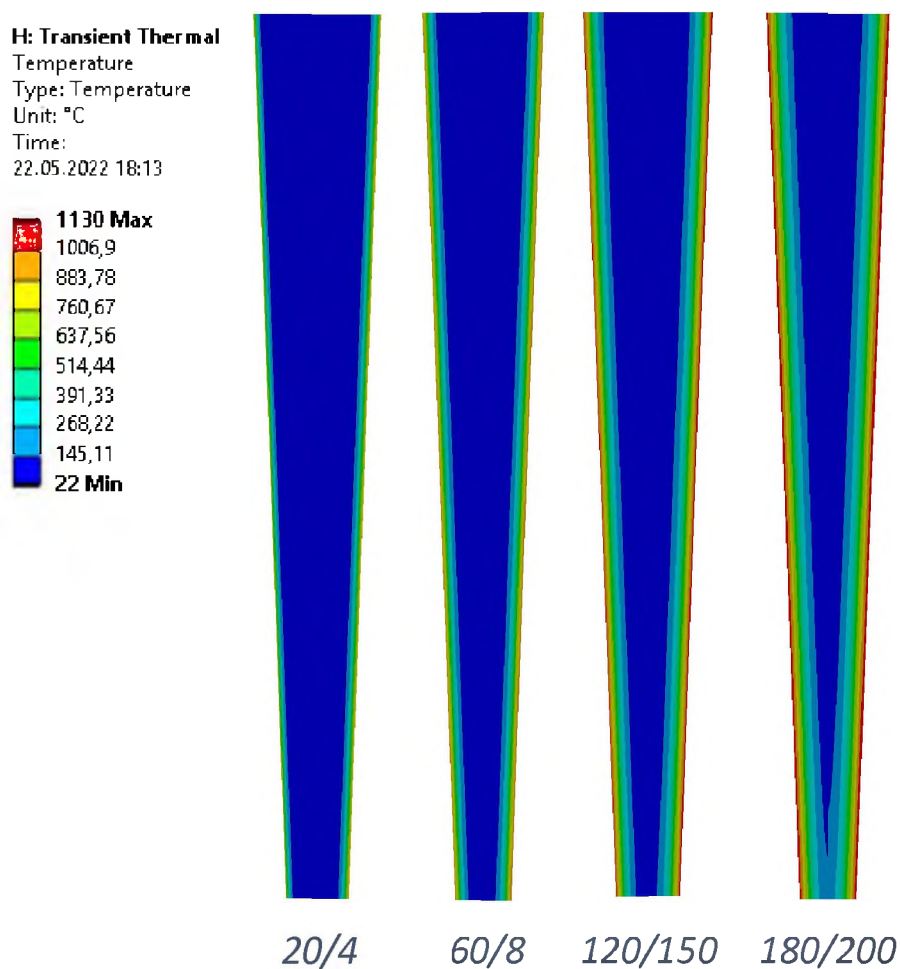


Рис. 16. Температурные поля в продольном сечении колонны при 20, 40, 60, 80, 120, 150, 180 и 200 минутах нагрева

Таблица 3

Параметры колонны

№ п/п	Параметр	Значение
1	Материал плиты, бетон	B70
2	Геометрические параметры колонны: – высота (h), мм – нижнее сечение – окружность диаметром (d), мм – верхнее сечение - овал сечением ($a \times b$), мм	9350 600 1280×600
3	Армирование ствольной части колонны: – диаметр арматуры, мм – количество, мм – класс арматуры	32 12 A500C
4	Армирование боковых частей колонны: – диаметр арматуры, мм – количество, мм – класс арматуры	32 12 A500C
5	Поперечное армирование колонны: – диаметр хомутов, мм – шаг хомутов, мм – класс арматуры	10 250 A500C
6	Расстояние от грани до центра сечения продольной арматуры (a), мм	70
7	Толщина защитного слоя бетона, мм	54

3. Заключение

В данной работе была решена задача нестационарной теплопроводности в программном комплексе ANSYS Workbench, были получены температурные поля при воздействии стандартного пожара, графики распределения температуры в зависимости от времени нагрева для основных несущих железобетонных элементов ММЦ: плиты перекрытия, балки, колонны. По результатам расчета предложена оценка огнестойкости конструкций на основе критерия потери теплоизолирующих свойств. Предел огнестойкости по потере теплоизолирующей способности: для плиты перекрытия происходит на 120 минуте пожара, для балки не наступает при нагреве в течении 200 минут, для колонны не нормируется.

Список используемых источников

1. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году. Статистический сборник / П. В. Полехин, М. А. Чебуханов, А. А. Козлов, А. Г. Фирсов, В. И. Сибирко, В. С. Гончаренко, Т. А. Чечерина

под ред. Д. М. Гордиенко. Москва: ВНИИПО, 2021. 112 с.

2. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности. Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ // Введ. 2009-05-01. Российская газета, 2008. 1 августа.

3. Теплотехнический расчет огнестойкости элементов железобетонных конструкций с использованием программной среды ANSYS / А. В. Ширко, А. Н. Камлюк, И. И. Полевода, Н. В. Зайнудинова // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2013. № 2(18). С. 260–269.

4. Яковлев А. И. Расчет пределов огнестойкости сжатых железобетонных конструкций по критическим деформациям // Сборник научных трудов «Поведение строительных конструкций в условиях пожара». Москва: ВНИИПО, 1987. С. 5-16.

5. Ефименко А. З., Ройтман В. М. Исследование влияния температуры на теплопроводность бетонов // Сборник научных трудов Института строительства и архитектуры МГСУ. Московский Государственный строительный университет, 2008. Выпуск 1. С.22-24.

6. Бардин А.В. Моделирование пожарной нагрузки на конструкции в программном комплексе ANSYS // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 6(45). С. 55-67.

7. Камлюк А. Н., Ширко А. В., Полевода И. И. Модели материалов арматуры и бетона для теплотехнических и прочностных расчетов на примере российского стандарта // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2013. № 1(17). С. 104–116.

8. СП 468.1325800.2019. Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности. Введ. 2020-06-11. Москва: Минстрой России, 2019. 107 с.

9. Пособие к СНиП II-2-80 по определению пределов огнестойкости конструкций, пределов распространения огня по конструкциям и групп возгораемости материалов. Москва: Стройиздат, 1985. 55 с.

10. El-Fitiany S. F., Youssef M. A. Simplified Method to Analyze Continuous Reinforced Concrete B // Aci Structural Journal, 2014. Sci. 111(1). P. 145-156.

11. Construction application of Fibre. Mesh method for protecting concrete columns in fire / Y-S. Heo, J. G. Sanjayan, C. G. Han, M. C. Han // Construction and Building Materials, 2011. 25(6). P. 2928–2938.

12. Youssef M. A., El-Fitiany S. F., Elfeki M. A. Flexural Behavior of Protected Concrete Slabs after Fire Exposure // Designing Concrete Structures for Fire Safety, 2008. P. 47-74.

13. Youssef M. A., Moftah M. General Stress-Strain Relationship for Concrete at Elevated Temperatures // Engineering Structures, 2007. 29(10). P. 2618-2634.

14. Willam K. J., Warnke E. P. Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete // Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering, 1975. 19. P. 174.

15. Phan L. T., Carino N. J. Review of Mechanical Properties of HSC at Elevated Temperature // ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 1998. 10(1). P. 58-64.

16. Abrams M. S. Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600°F // Temperature and Concrete (Special Publication American Concrete Institute), 1971. 25. P. 33-59.

17. Hertz K. D. Concrete strength for fire safety design // Mag Concrete Res, 2005. 57(8). P. 445-453.

18. Malhotra H. L. Effect of Temperature on the Compressive Strength of Concrete // Mag Concrete Res, 1956. 8. P. 85-94.

19. Anderberg Y., Thelandersson S. Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperatures: 2 Experimental Investigation and Material Behaviour Model // Bulletin 54. Sweden, Lund: Lund Institute of Technology 1976.

20. Яковлев А. И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. Москва: Стройиздат, 1988. 143 с.

21. Белов В. В., Семенов К. В., Ренев И. А. Огнестойкость железобетонных конструкций: модели и методы расчета // Magazine of civil engineering. 2010. №6.

22. Учебно-методическое пособие в помощь специалистам проектных и монтажных организаций. Раздел I: Противопожарная защита высотных зданий и уникальных объектов. Москва: ООО ПКФ «Эндемик», 2004. 85 с.

23. СТО 36554501-006-2006. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. Введ. 2006-10-20. Москва: ФГУП «НИЦ Строительство», 2006. 77 с.

References

1. Polekhin P. V. et al. (2021). Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2020 godu. Statisticheskij sbornik [Fires and fire safety in 2020. Statistical collection]. Moscow: VNIPO. P. 112 (In Russian).
2. Tekhnicheskij reglament o trebovaniyah pozharnoj bezopasnosti. Federal'nyj zakon Rossijskoj Federacii ot 22 iyulya 2008 g. № 123-F (2008). [Technical regulation on fire safety requirements. Federal Law of the Russian Federation of July 22, 2008 N 123-FZ]. Introduction. 2009-05-01. Russian newspaper, August 1 (In Russian).
3. Shirko A. V., Kamlyuk A. N., Polevoda I. I., Zainudinova N. V. (2013). Teplotekhnicheskij raschet ognestojkosti elementov zhelezobetonnyh konstrukcij s ispol'zovaniem programnoj sredy ANSYS [Thermotechnical calculation of fire resistance of elements of reinforced concrete structures using the ANSYS software environment]. Bulletin of the Command and Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus. N 2(18). P. 260–269. (In Russian).
4. Yakovlev A. I. (1987). Raschet predelov ognestojkosti szhatyh zhelezobetonnyh konstrukcij po kriticheskim deformacijam [Calculation of fire resistance limits of compressed reinforced concrete structures according to deformation costs]. Collection of scientific papers «Behavior of building structures in fire conditions». Moscow: VNIPO. P. 5-16. (In Russian).
5. Efimenko A. Z., Roytman V. M. (2008). Issledovanie vliyaniya temperatury na teploprovodnost' betonov [Study of the effect of temperature on the thermal conductivity of concrete]. Collection of scientific works of the Institute of Construction and Architecture MGSU.

Moscow State University of Civil Engineering. Issue 1. P. 22-24. (In Russian).

6. Bardin A.V. (2016). Modelirovanie pozharnoj nagruzki na konstrukcii v programmnom komplekse ANSYS [Modeling fire load on structures in the ANSYS software package]. Construction of unique buildings and structures. N 6(45). P. 55-67. (In Russian).

7. Kamlyuk A.N., Shirko A.V., Polevoda I.I. (2013). Modeli materialov armatury i betona dlya teplotekhnicheskikh i prochnostnyh raschetov na primere rossijskogo standarta [Models of reinforcement and concrete materials for heat engineering and strength calculations on the example of the Russian standard]. Bulletin of the Command and Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus. N 1(17). P. 104–116. (In Russian).

8. SP 468.1325800.2019. (2019) Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Pravila obespecheniya ognestojkosti i ognesohrannosti [Concrete and reinforced concrete structures. Rules for ensuring fire resistance and fire safety]. Introduction 2020-06-11. Moscow: Ministry of Construction of Russia. P. 107. (In Russian).

9. Posobie k SNIIP II-2-80 (1985) po opredeleniyu predelov ognestojkosti konstrukcij, predelov rasprostraneniya ognya po konstrukciyam i grupp vozgoraemosti materialov [Manual to SNIIP II-2-80 for determining the fire resistance limits of structures, the limits of fire propagation along structures and the flammability groups of materials]. Moscow: Stroyizdat. P. 55. (In Russian).

10. El-Fitiany S. F., Youssef M. A. (2014). Simplified Method to Analyze Continuous Reinforced Concrete B. *Aci Structural Journal*. Sci. 111(1). P. 145-156.

11. Heo, Y-S., Sanjayan, J., Han, C. G., & Han, M. C. (2011). Construction application of fibre. Mesh method for protecting concrete columns in fire. *Construction and Building Materials*, 25(6), P. 2928 - 2938.

12. Youssef M. A., El-Fitiany S. F., Elfeki M. A. (2008). Flexural Behavior of Protected Concrete Slabs after Fire Exposure. *Designing Concrete Structures for Fire Safety*. P. 47-74.

13. Youssef M. A., Moftah M. (2007). General Stress-Strain Relationship for Concrete at Elevated Temperatures. *Engineering Structures*. 29(10). P. 2618-2634.

14. Willam K. J., Warnke E. P. (1975). Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete // *Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering*. 19. P. 174.

15. Phan LT, Carino NJ. (1998). Review of Mechanical Properties of HSC at Elevated Temperature. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*. 10(1). P. 58-64.

16. Abrams M. S. (1971) Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600°F. *Temperature and Concrete (Special Publication American Concrete Institute)*. 25. P. 33-59.

17. Hertz K. D. (2005). Concrete strength for fire safety design. *Mag Concrete Res*. 57(8). P. 445-453.

18. Malhotra H. L. (1956). Effect of Temperature on the Compressive Strength of Concrete. *Mag Concrete Res*. 8. P. 85-94.

19. Anderberg Y, Thelandersson S. (1976). Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperatures: 2 Experimental Investigation and Material Behaviour Model. *Bulletin 54*. Sweden, Lund: Lund Institute of Technology.

20. Yakovlev A. I. (1988). Raschet ognestojkosti stroitel'nyh konstrukcij [Calculation of fire resistance of building structures]. Moscow: Stroyizdat. P. 143. (In Russian).

21. Belov V. V., Semenov K. V., Renev I. A. (2010). Ognestojkost' zhelezobetonnyh konstrukcij: modeli i metody rascheta [Fire resistance of reinforced concrete structures: models and calculation methods]. *Magazine of civil engineering*. №6. (In Russian).

22. Uchebno-metodicheskoe posobie v pomoshch' specialistam proektnyh i montazhnyh organizacij. Razdel I: Protivopozharnaya zashchita vysotnyh zdaniy i unikal'nyh obektov (2004) [Educational and methodological manual to help specialists of design and installation organizations. Section I: Fire protection of high-rise buildings and unique objects]. Moscow: LLC PKF «Endemik». P. 85. (In Russian).

23. STO 36554501-006-2006. (2006). Pravila po obespecheniyu ognestojkosti i ognesohrannosti zhelezobetonnyh konstrukcij [Rules for ensuring fire resistance and fire safety of reinforced concrete structures]. Introduction 2006-10-20. Moscow: FGUP «NITs Construction». P. 77 (In Russian).