

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2022.6-1.42>

УДК 614.841.332:624.012.45

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ОГНЕСТОЙКОСТИ СОВРЕМЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ANSYS

Полева И.И.

Цель. Разработать методику определения пределов огнестойкости современных строительных конструкций из железобетона, основанную на компьютерном моделировании их прогрева при пожаре, а также моделировании с учетом изменяющихся свойств бетона и арматуры.

Методы. Для решения поставленных задач применены теоретические и экспериментальные методы исследования. Методом конечных элементов выполнена оценка огнестойкости по потере несущей способности. Теоретический метод основан на решении теплофизической и статической задач. Для оценки огнестойкости современных строительных конструкций из железобетона необходимо знать схемы их разрушения при нестационарном нагреве, а также температурные распределения по сечению конструкции. Для получения этих данных проведены как лабораторные, так и натурные испытания.

Результаты. Разработана методика определения пределов огнестойкости по потере несущей способности (R) современных строительных конструкций из железобетона. Методика реализована в программно-вычислительном комплексе ANSYS. Численное конечно-элементное моделирование позволило определить предел огнестойкости по потере несущей способности и разработать методы повышения огнестойкости. Результаты численного моделирования сопоставлены с экспериментальными данными.

Область применения исследований. Полученные результаты могут применяться при разработке норм проектирования и конструирования железобетонных конструкций, а разработанная методика может быть использована для решения задач по оценке огнестойкости строительных конструкций и элементов при проектировании и строительстве зданий и сооружений, в том числе в рамках действующих норм.

Ключевые слова: предел огнестойкости, железобетонные конструкции, стандартный температурный режим, температурные поля, моделирование, метод конечных элементов.

(Поступила в редакцию 14 января 2021 г.)

Введение

В зданиях и сооружениях, возводимых на территории Республики Беларусь, нашли широкое применение современные строительные конструкции, такие как центрифугированные (тонкостенные) железобетонные колонны, изгибаемые железобетонные предварительно напряженные плиты без сцепления арматуры с бетоном, конструкции из высокопрочного и модифицированного бетона. При этом они должны соответствовать противопожарным требованиям в части пределов огнестойкости и классов пожарной опасности, которые и определяют область использования строительных конструкций^{1, 2}. Поскольку железобетонные конструкции вследствие негорючести бетона и арматуры относят к классу пожарной опасности КО³, то основным показателем, определяющим их область применения, является характеристика «предел огнестойкости», а именно потеря несущей способно-

¹ ТР 2009/013/ВУ. Технический регламент Республики Беларусь. Здания и сооружения, строительные материалы и изделия. Безопасность. – Введ. 31.12.09. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2015. – 28 с.

² СН 2.02.05-2020 Пожарная безопасность зданий и сооружений: СН 2.02.05-2020: введ. 04.04.21 (взамен СН 2.02.01-2019, с отменой ТКП 45-2.02-315-2018 (33020)). – Минск: Минстройархитектуры, 2021. – 70 с.

³ Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть: ГОСТ 30244-94. – Введ. 01.01.96. – М.: Стандартинформ, 2008. – 19 с.

сти вследствие обрушения конструкции или возникновения предельных деформаций (предел огнестойкости R)⁴.

Использование существующих методик расчета пределов огнестойкости по потере несущей способности для современных центрифугированных конструкций, конструкций железобетонных предварительно напряженных без сцепления арматуры с бетоном, а также выполненных из высокопрочного и модифицированного бетона является некорректным и неурегулированным в области нормирования, поскольку они не учитывают конструктивные и структурные особенности.

Основная часть

В основе метода оценки огнестойкости – классическая методика. Сущность расчета пределов огнестойкости по предельному состоянию R заключается в определении длительности пожара, при которой остаточное расчетное предельное усилие $R_{d,fi}$, которое способна воспринимать конструкция при пожаре в предельном состоянии, становится равным расчетному значению нагрузки $E_{d,fi}$. Данный расчет состоит из двух последовательных частей: теплотехнической и статической (рис. 1).

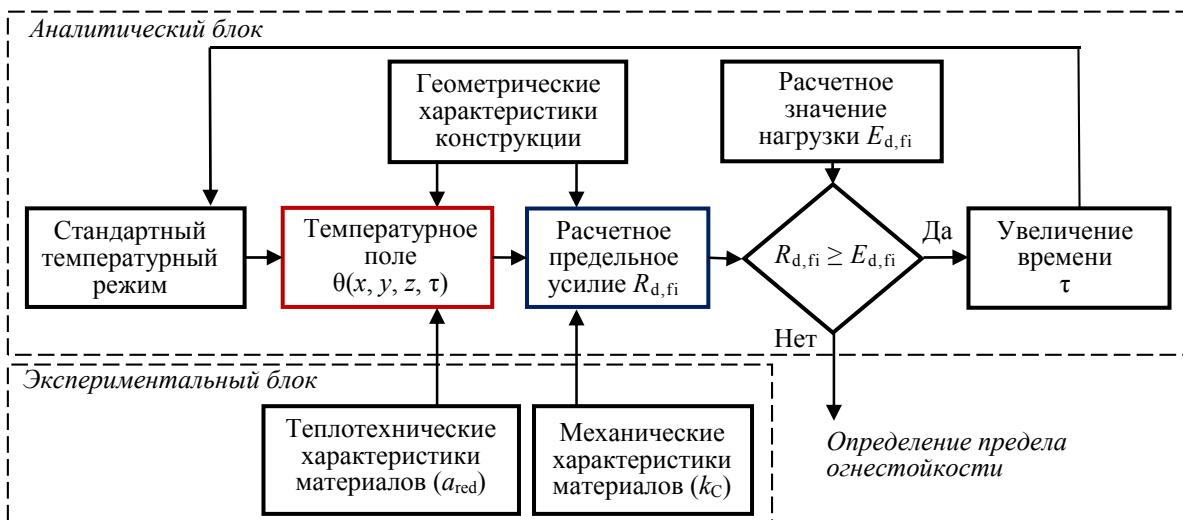


Рисунок 1. – Блок-схема расчета пределов огнестойкости железобетонных конструкций

Теплотехническая часть проводится для определения распределения температур по сечению конструкций при пожаре. Статическая часть предназначена для оценки прочности и устойчивости конструкций с использованием условия безопасности по огнестойкости.

Для получения расчетных данных и определения механизмов разрушения разработаны и испытаны три типа железобетонных конструкций: железобетонные балки из высокопрочного бетона, железобетонные предварительно напряженные плиты без сцепления арматуры с бетоном, центрифугированные железобетонные колонны [1–3]. Железобетонные балки и плиты подвергались стандартному огневому испытанию в лабораторных условиях, колонны – как часть фрагмента здания при натурных испытаниях. На основании экспериментальных и теоретических исследований стандартная методика определения предела огнестойкости адаптирована для каждого типа железобетонных конструкций. Например, для железобетонных предварительно напряженных конструкций без сцепления арматуры с бетоном характерно сильное хрупкое разрушение защитного слоя бетона, что существенно влияет на огнестойкость конструкции. Поэтому, помимо механических и теплотехнических характеристик бетона и арматуры, в методику заложен блок «Изменение расчетных геометрических характеристик конструкции с учетом возможного хрупкого разрушения защитного слоя». Методика расчета предела огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном представлена на рисунке 2.

⁴ Строительные конструкции. Порядок расчета пределов огнестойкости: ТКП 45-2.02-110-2008 (02250). – Введ. 01.01.09 (с отменой на территории Респ. Беларусь П1-02 к СНБ 2.02.01-98). – Минск: Мин-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2008. – 135 с.

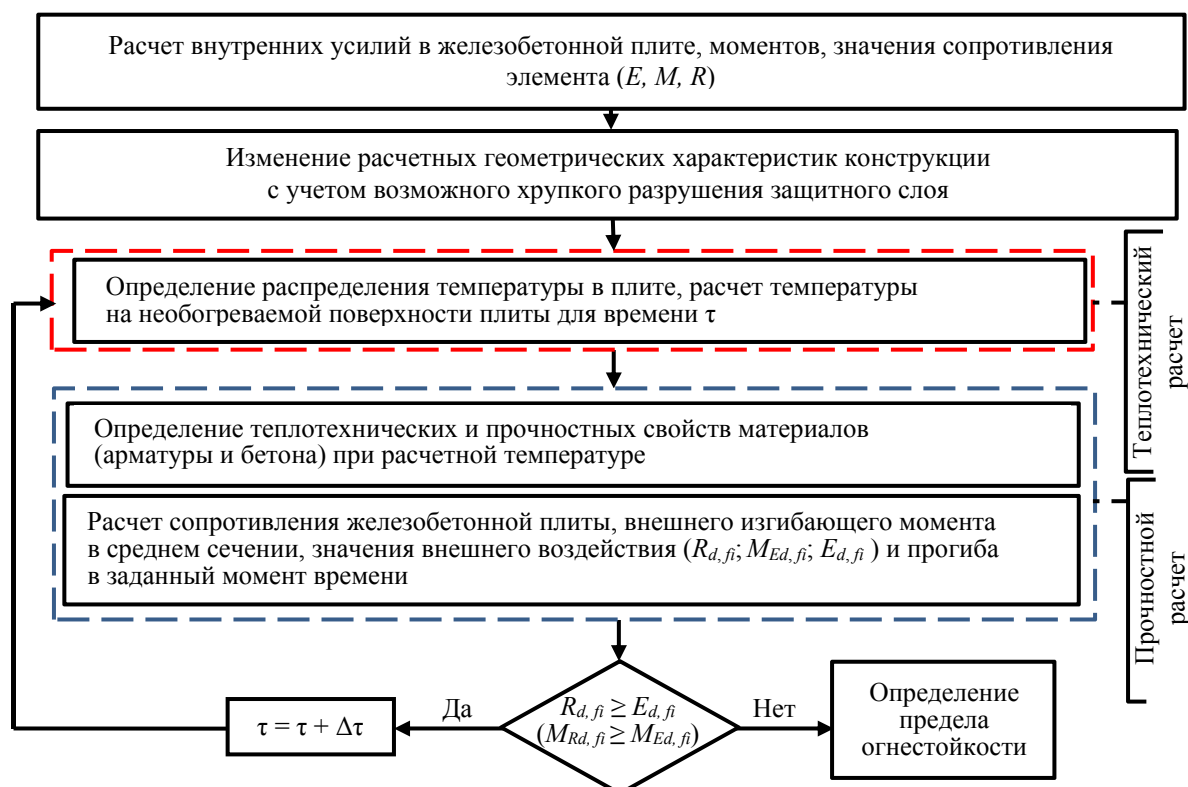


Рисунок 2. – Методика расчета предела огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном⁵

При разработке методики для железобетонных центрифугированных колонн следовало учесть ряд особенностей, которые способствуют более скорому прогреву и определяют поведение под нагрузкой, таких как:

наличие воздушной полости в конструкции (отсутствие бетонного ядра), что позволяет практически всему количеству теплоты, получаемой конструкцией при пожаре, аккумулироваться в ее сплошной части;

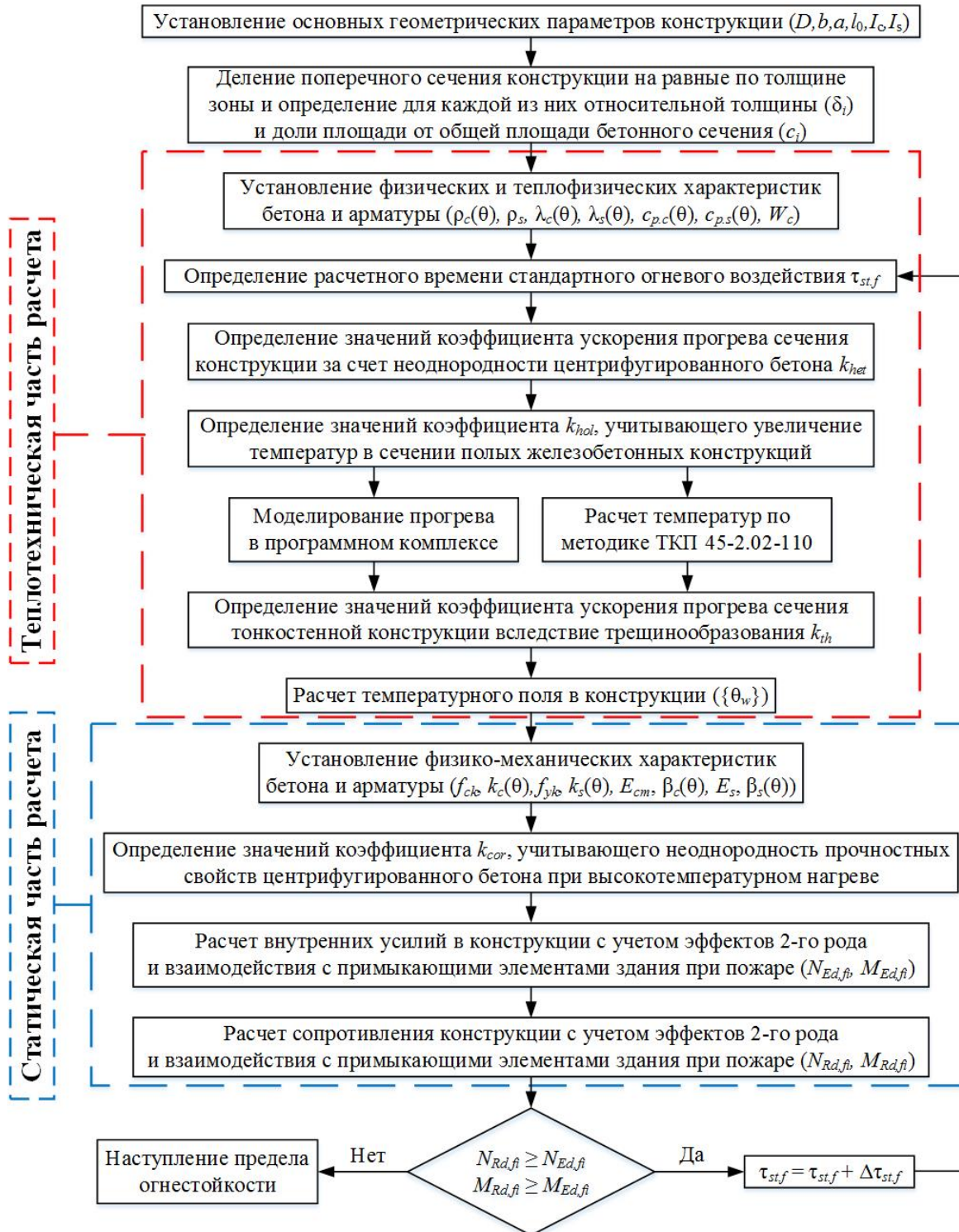
неоднородность характеристик центрифугированного бетона в поперечном сечении конструкции, которая способствует более скорому прогреву сечения и снижению механических показателей бетона;

тонкостенность конструкции, приводящая к более раннему трещинообразованию в конструкции и вследствие этого усиливающемуся прогреву [4].

Для учета данных особенностей в теплотехнической части расчета заложены блоки «Определение значений коэффициента ускорения прогрева сечения конструкции за счет неоднородности центрифугированного бетона k_{het} », «Определение значений коэффициента k_{hol} , учитывающего увеличение температур в сечении полых железобетонных конструкций» и «Определение значений коэффициента ускорения прогрева сечения тонкостенной конструкции вследствие трещинообразования, k_{th} », а в статистической части расчета «Определение значений коэффициента k_{cor} , учитывающего неоднородность прочностных свойств центрифугированного бетона при высокотемпературном нагреве». Полученные значения k_{cor} учитываются при определении приведенного значения коэффициента условий работы центрифугированного бетона при огневом воздействии.

Методика расчета пределов огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн представлена на рисунке 3.

⁵ Зайнудинова, Н.В. Огнестойкость изгибаемых железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Н.В. Зайнудинова; Ун-т гражданской защиты МЧС Беларуси. – Минск, 2020. – 24 с.



D – наружный диаметр колонны; b и a – толщины конструкции и защитного слоя бетона; l_0 – расчетная длина колонны; I_c – момент инерции сечения бетона относительно центра тяжести сечения колонны; I_s – момент инерции площади сечения арматуры относительно центра тяжести сечения колонны; θ – температура; $\rho_c(\theta)$ – кажущаяся плотность бетона; ρ_s – плотность стали; $\lambda_c(\theta)$ и $\lambda_s(\theta)$ – коэффициенты теплопроводности бетона и стали; $c_{p.c}(\theta)$ и $c_{p.s}(\theta)$ – коэффициенты удельной изобарной теплоемкости бетона и стали; W_c – весовая влажность бетона; f_{ck} – нормативное (характеристическое) сопротивление бетона сжатию; f_{yk} – нормативное (характеристическое) сопротивление арматуры; $k_c(\theta)$ и $k_s(\theta)$ – коэффициенты условий работы бетона и арматуры при пожаре; E_{cm} – средний модуль упругости бетона; E_s – модуль упругости арматуры; $\beta_c(\theta)$ и $\beta_s(\theta)$ – коэффициенты изменения E_{cm} и E_s при нагреве; $N_{Ed,fi}$ и $M_{Ed,fi}$ – расчетные продольное усилие и изгибающий момент в сечении при пожаре; $N_{Rd,fi}$ и $M_{Rd,fi}$ – сопротивления сечения продольному усилию и изгибающему моменту при пожаре;

$\Delta\tau_{st.f}$ – увеличение времени огневого воздействия стандартного пожара

Рисунок 3. – Методика расчета пределов огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн [4]

Теплотехнический расчет. Проведение теплотехнической части расчета по разработанным методикам реализовано с применением метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS Workbench. Для этого построены геометрические модели экспериментальных конструкций, заданы материалы и их свойства. Параметры теплообмена между огневой средой и конструкцией при назначении граничных условий заданы в соответствии с СН 2.01.03⁶, для колонн – по результатам натуральных испытаний.

Начальные условия: температура в расчетном сечении конструкции одинакова и равна температуре окружающей среды. Граничные условия:

– балки, плиты: изменение температуры газовой среды происходит согласно кривой стандартного пожара; колонны – согласно значениям среднеобъемных температур, полученных во время натуральных огневых испытаний;

– в месте примыкания арматуры к бетону принят идеальный тепловой контакт;

– степень черноты поверхности бетона принимали равной 0,7, степень черноты пожара – 1,0, приведенная степень черноты для системы внутренняя поверхность колонны – газовая среда в полости не превышала 0,4;

– балки, плиты: теплоотдача с необогреваемой поверхности определяется как сумма теплового потока за счет конвективного теплообмена и теплового потока за счет излучения; колонны – коэффициент теплоотдачи конвекцией α между внешней поверхностью центрифугированной колонны и огневой средой принят равным 25 Вт/(м²·°С), между внутренней поверхностью и газовой средой в полости – 3,0...3,8 Вт/(м²·°С).

В ходе выполнения теплотехнического расчета огнестойкости железобетонных балок получены температурные поля, которые возможно импортировать в прочностной модуль, позволяющие производить расчет напряженно-деформированного состояния за весь временной интервал нагрева элементов железобетонных конструкций (рис. 4). В таблице 1 приведены результаты расчета температуры в сечении балки по СТО 36554501-006-2006⁷ и в ANSYS Workbench.

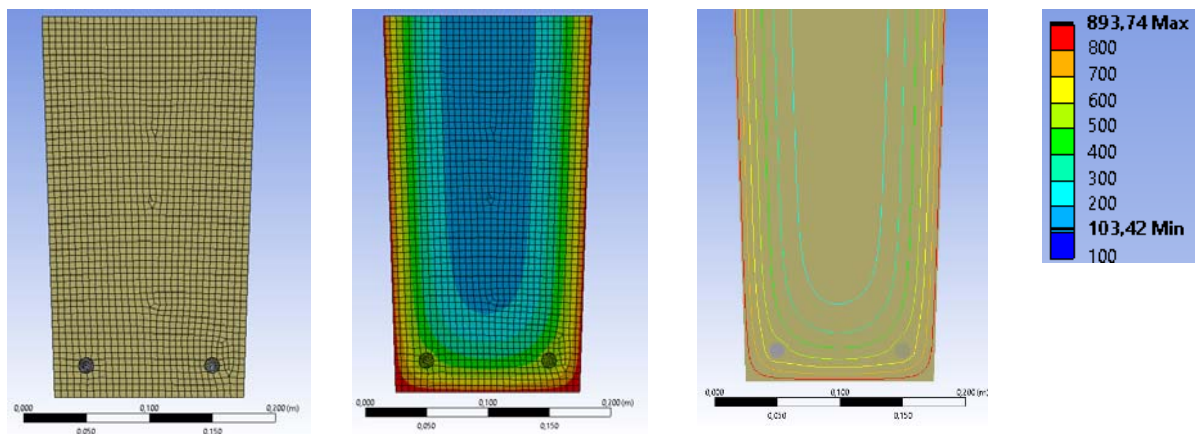


Рисунок 4. – Расчетная схема нагрева железобетонной балки сечением 150 × 300 мм, расстояние до оси арматуры 25 мм

Таблица 1. – Температура бетона в исследуемой зоне

Параметр зоны	Номер зоны (i)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура (упрощенный метод), °С	802	663	535	418	315	227	154	97	56	30
Температура (ANSYS), °С	759	597	479	379	306	245	199	164	136	58
Доля зоны	0,123	0,118	0,113	0,108	0,103	0,098	0,093	0,088	0,083	0,073

⁶ СН 2.01.03-2019. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости. – Введ. 08.09.20. – Минск: Минстройархитектуры, 2020. – 43 с.

⁷ Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций: СТО 36554501-006-2006. – Введ. 01.11.06. – М.: ФГУП НИЦ Стр-во, 2006. – 75 с.

В ANSYS Workbench получена зависимость температуры арматуры железобетонной балки сечением 150×300 мм и расстоянием до оси арматуры 25 мм от времени (рис. 5).

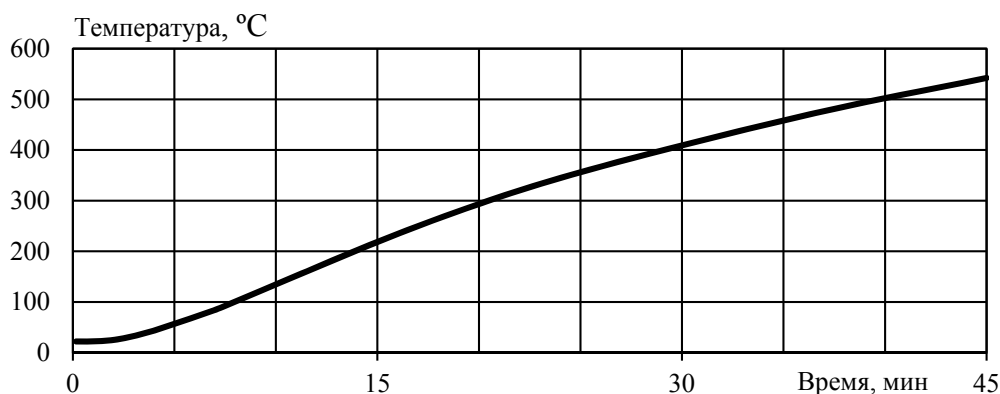
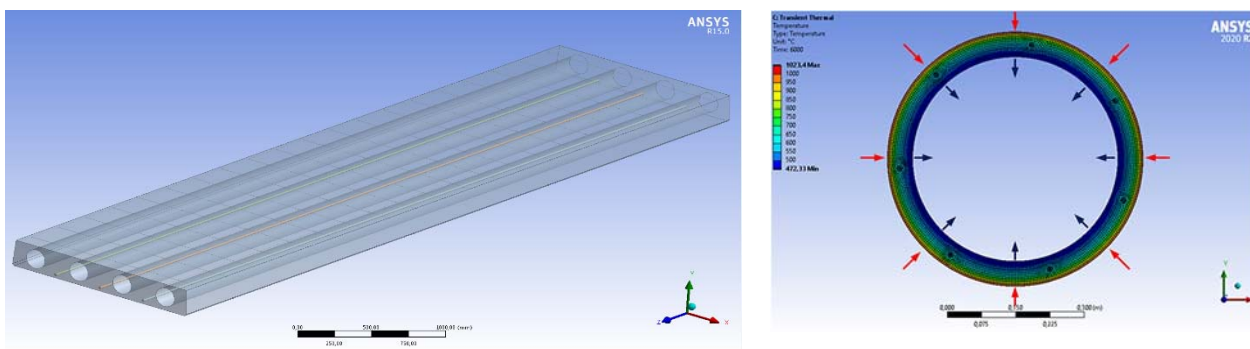


Рисунок 5. – График зависимости температуры арматуры балки от времени при моделировании

Модели железобетонной плиты без сцепления арматуры с бетоном и железобетонной центрифугированной колонны представлены на рисунке 6.



а – модель железобетонной предварительно напряженной плиты без сцепления арматуры с бетоном

б – модель центрифугированной колонны

Рисунок 6. – Геометрические модели экспериментальных конструкций

В ходе решения теплотехнической задачи для железобетонной плиты без сцепления арматуры с бетоном получена температура на необогреваемой поверхности, которая позволяет давать оценку огнестойкости плиты по критерию потери теплоизолирующей способности (рис. 7).

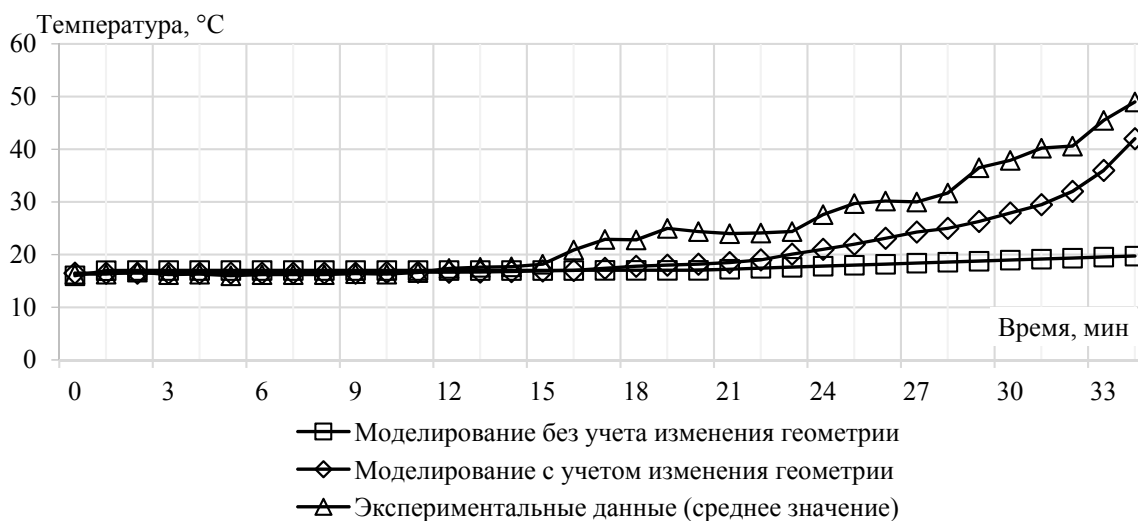


Рисунок 7. – График зависимости температуры на необогреваемой поверхности плиты от времени при моделировании и эксперименте [2]

Предел огнестойкости по потере теплоизолирующей способности при огневых испытаниях на момент разрушения конструкции не достигнут. При огневых испытаниях средняя температура на необогреваемой поверхности составила 49 °С, максимальная 90 °С. При моделировании на 33-й мин температура на поверхности конструкции составляет 19,7 °С. Получены зависимости температуры арматуры от времени стандартного огневого испытания (рис. 8).

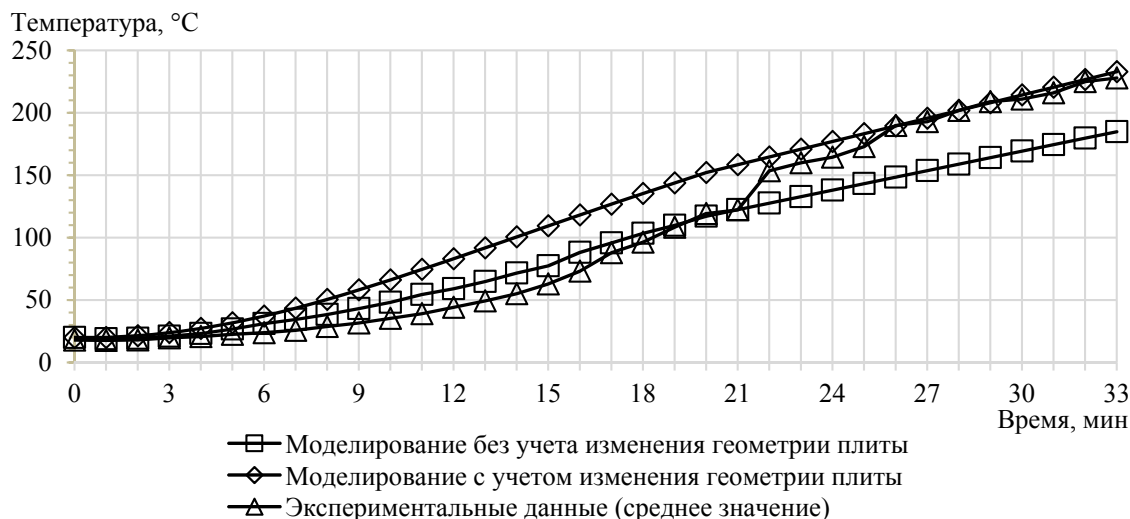


Рисунок 8. – График зависимости температуры арматуры от времени при моделировании и эксперименте [2]

Критическая температура для канатов, применяемых в конструкциях без сцепления арматуры, определена расчетным и экспериментальным методом и составила 230 °С.

На рисунке 9 приведено сопоставление результатов моделирования и расчета с экспериментальными данными для испытанных колонн.

Как видно из рисунка 9, результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными. Значения температуры арматуры, полученные в результате моделирования с учетом поправочных коэффициентов k_{het} и k_{th} , находятся в пределах границ доверительного интервала экспериментальных значений (при уровне доверительной вероятности 95 %).

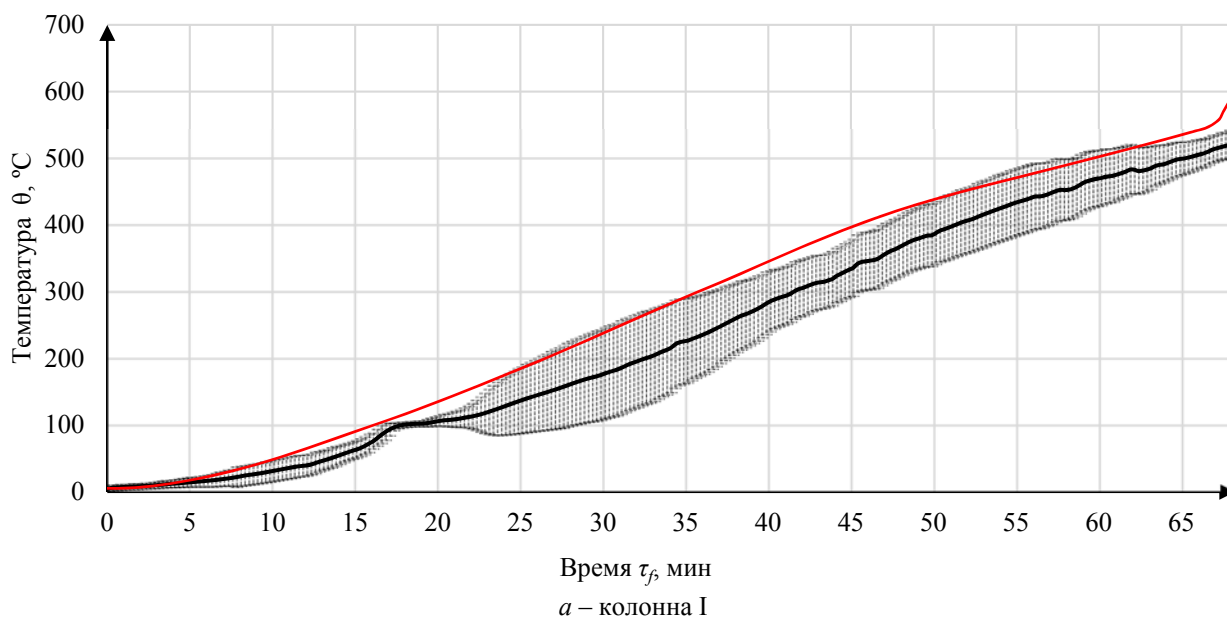


Рисунок 9. – График зависимости температуры арматуры от времени при моделировании и эксперименте [5]

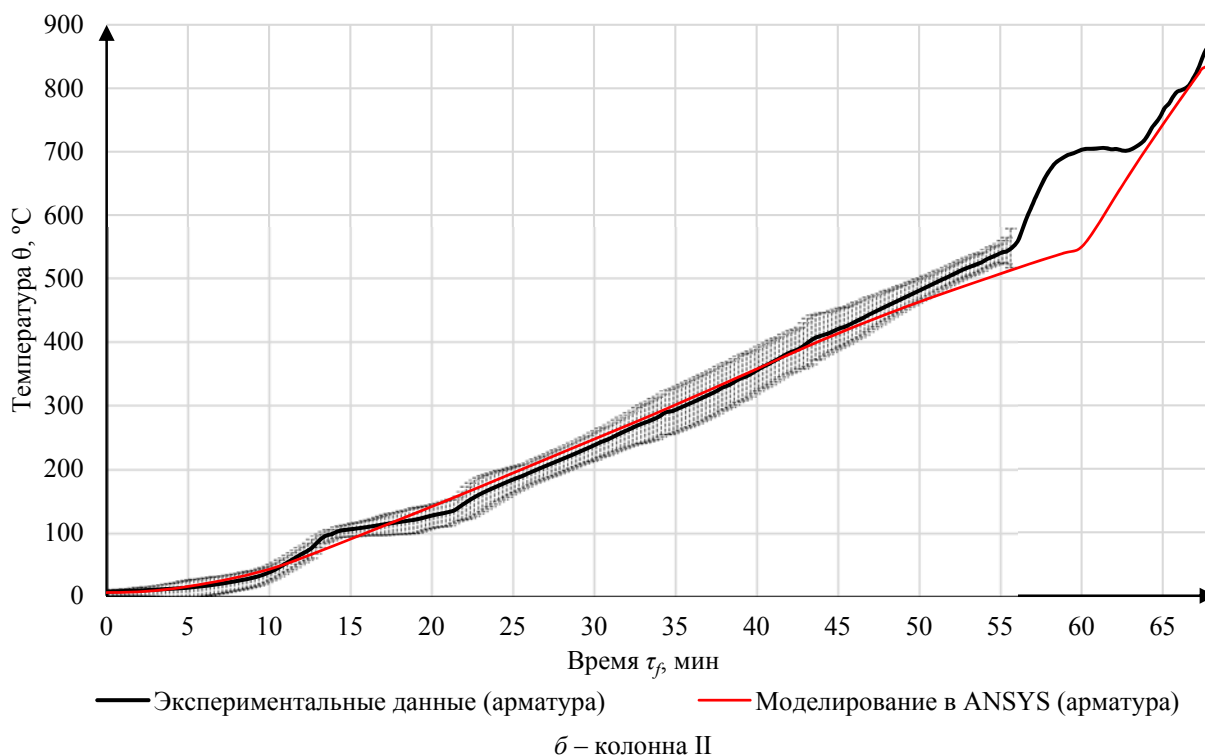


Рисунок 9. – График зависимости температуры арматуры от времени при моделировании и эксперименте [5]

Статическая часть расчета. При проведении статического расчета балок из высокопрочного бетона применялся зонный подход [6]. Наиболее полно реализовать преимущества зонного метода позволяет коэффициент k_{CM} , показывающий долю сечения бетона, которая способна выполнять свои функции при пожаре, и позволяющий учесть влияние состава бетонной смеси. Величина коэффициента k_{CM} , с учетом вариации температуры в каждой зоне определена по формуле (1):

$$k_{CM} = \left(1 - \frac{0,2}{m}\right) \cdot \sum_{i=1}^m c_i \cdot k_C(\theta_i), \quad (1)$$

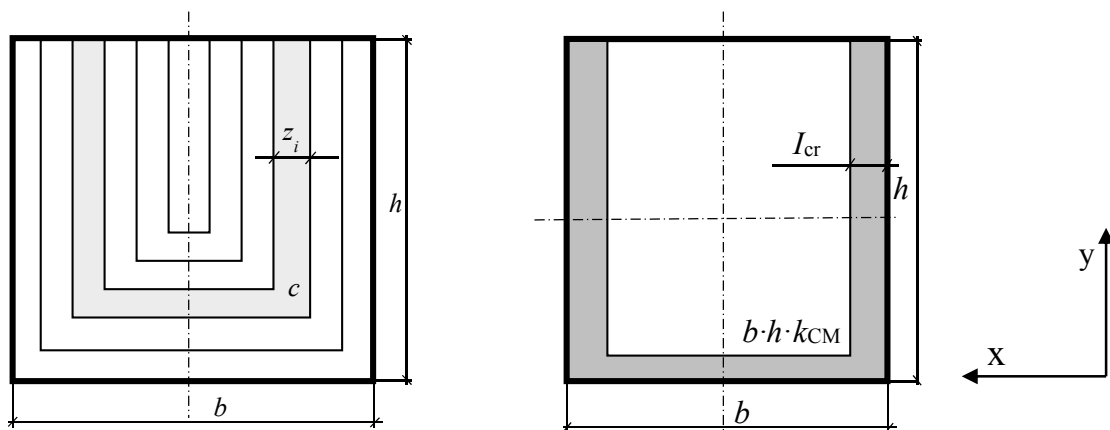
где m – количество зон; $c_i = A_{ci} / A_c$ – доля площади i -й зоны A_{ci} от общей площади поперечного сечения бетона A_c ; $k_C(\theta_i)$ – коэффициент условий работы бетона при пожаре; θ_i – температура i -й зоны.

Для конструкций прямоугольной формы c_i определено с использованием формулы 2 [6]:

$$c_i = \frac{z \cdot (2h + b - z \cdot [4i - 2])}{b \cdot h}, \quad (2)$$

где z – ширина зоны, принимается наиболее близкой диаметру арматуры, м; b, h – длина и ширина поперечного сечения конструкции, м; i – номер рассматриваемой зоны.

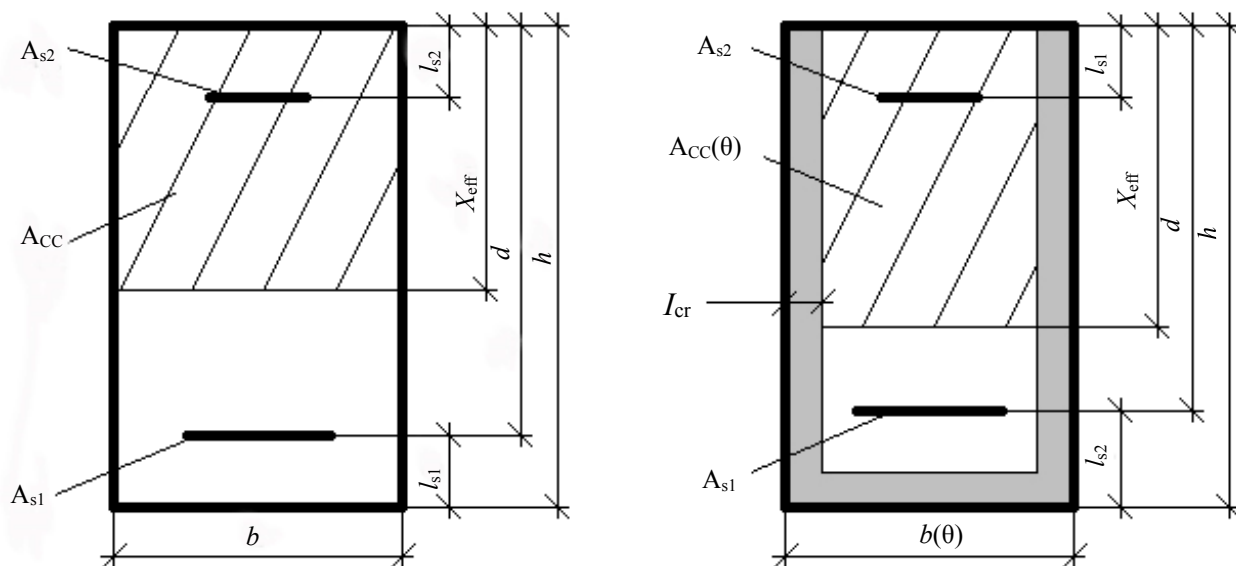
Таким образом, сечение балок было разделено на 10 зон, доля площади каждой из них уменьшалась от 0,165 до 0,063 (рис. 10).



c – площадь зоны; z_i – ширина i -й зоны, I_{cr} – толщина слоя бетона, прогреваемого до критической температуры

Рисунок 10. – Применение зонного метода и эффективная область сечения бетонной конструкции

Расчетная схема для изгибаемой конструкции при нормальных условиях и при пожаре представлена на рисунке 11.



A_{cc} – площадь сечения бетона в сжатой зоне; A_{s1} и A_{s2} – площади растянутой и сжатой арматур;

X_{eff} – высота сжатой зоны бетона; l_{s1} и l_{s2} – расстояния до осей растянутой и сжатой арматур

Рисунок 11. – Расчетная схема для изгибаемой конструкции при нормальных условиях и при пожаре

Расчет пределов огнестойкости железобетонных балок выполнен в безразмерных величинах, т.е. определен остаточный уровень предельного усилия $\eta_{fi}(\theta)$ (формула (3)), который способна воспринимать железобетонная конструкция с учетом изменения механических свойств бетона и арматуры при нагреве, с определением времени (τ), при котором данная величина становится равной уровню приложенной нагрузки η_{fi} [6].

$$\eta_{fi}(\theta) = 1,1 \cdot k_{SM1} \cdot \frac{d_x - \Delta}{d_x} = 1,1 \cdot k_{SM1} \cdot k_{XT}, \quad (3)$$

где d_x – расстояние между осью растянутой арматуры и центром тяжести сжатой зоны бетона, м; Δ – величина, показывающая изменение расстояния между осью растянутой арматуры и центром тяжести сжатой зоны бетона при пожаре, м; k_{SM1} – приведенный коэффициент работы растянутой арматуры при пожаре.

В таблице 2 приведены результаты расчетов пределов огнестойкости балок экспериментальной конструкции, проведенных с использованием формулы (3). Полученные

в результате расчетов и эксперимента результаты не отличаются более чем на 16 %, при этом значение расчетных данных для всех составов ниже экспериментальных.

Таблица 2. – Результаты расчета предела огнестойкости балок [1; 6–7]

Номер состава	Время, ч	k_{RM}^*	k_{CX}	k_{SM}^*	Δ , м	k_{XT}	$\eta_{п}(\theta)$	Предел огнестойкости, ч		ε , %
								расчет ⁸	эксперимент	
1	0,50	8,3	0,744	0,66	0,000	0,999	0,726	0,91	1,01	9,9
	0,75	8,3	0,627	0,19	0,004	0,986	0,202			
	1,00	8,3	0,530	0,06	0,005	0,982	0,065			
	1,25	8,3	0,452	0,00	0,006	0,979	0,000			
2	0,50	10,7	0,777	0,68	0,000	0,999	0,747	0,86	1,03	16,5
	0,75	10,7	0,668	0,15	0,005	0,979	0,162			
	1,00	10,7	0,578	0,05	0,006	0,976	0,054			
	1,25	10,7	0,498	0,00	0,007	0,972	0,000			
3	0,50	11,6	0,739	0,68	0,000	1,000	0,748	0,88	1,00	12,0
	0,75	11,6	0,621	0,16	0,006	0,979	0,172			
	1,00	11,6	0,524	0,06	0,007	0,975	0,064			
	1,25	11,6	0,446	0,00	0,008	0,970	0,000			

Примечание. k_{RM} – коэффициент, учитывающий отношение расчетных сопротивлений арматуры и бетона; k_{SM} – приведенный коэффициент работы арматуры при пожаре.

Статический расчет железобетонных плит без сцепления арматуры с бетоном выполнен в программном комплексе ANSYS Workbench. Начальные условия: нагрузка распределена равномерно по необогреваемой поверхности конструкции, учитывается вес конструкции; граничные условия: шарнирное опирание плиты по концам (шарнирная неподвижная опора и шарнирная подвижная опора).

В результате моделирования получены зависимости прогиба плиты от времени огневого воздействия. В начальный момент времени к плите прикладывается рабочая нагрузка, а затем последовательно температурные поля. В результате увеличения температурных деформаций увеличивается прогиб плиты. График зависимости максимального прогиба плиты от времени нагрева в сопоставлении с экспериментальными данными приведен на рисунке 11.

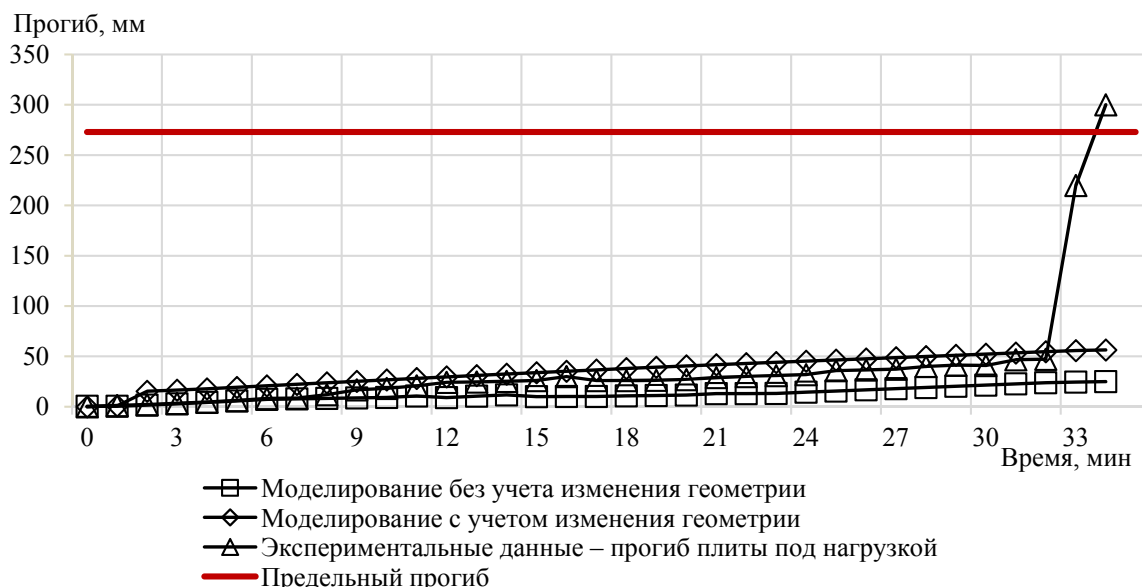


Рисунок 11. – График зависимости прогиба плит от времени при моделировании и эксперименте [8]

Предел огнестойкости по общей методике составил R60, по разработанной – R30, при экспериментальных исследованиях – R33.

⁸ См. сноску 7.

Для железобетонных центрифугированных колонн статическая часть расчета выполнена в ПК ЛИРА-САПР с учетом температурных полей, полученных при теплотехническом расчете в программном комплексе ANSYS [9]. Колонны в модели задавались стержнями длиной 2350 и 400 мм (участок со шпонкой). Учитывался собственный вес конструкций и фактическое размещение статической нагрузки на плите в процессе испытаний (рис. 12).

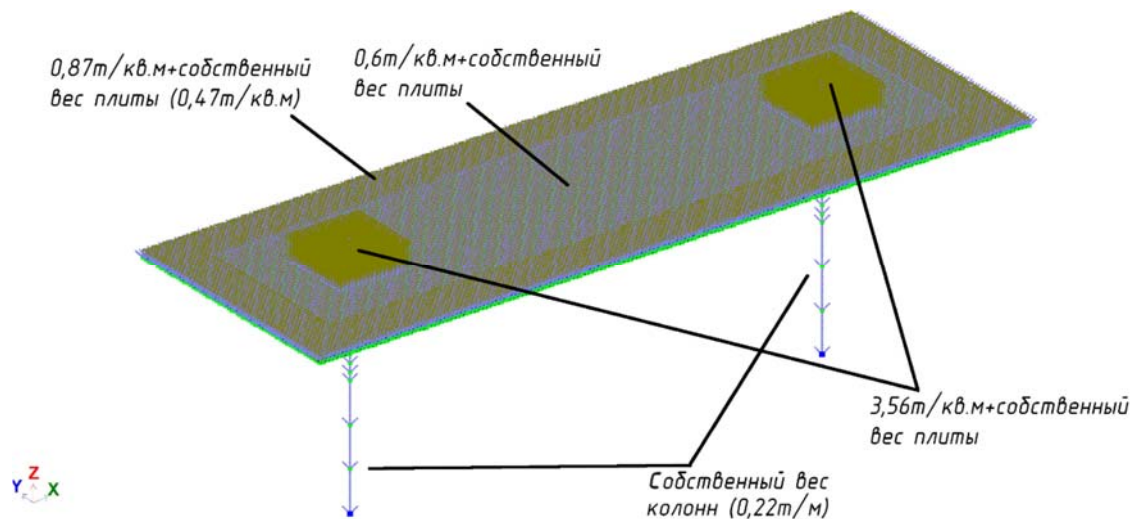


Рисунок 12. – Модель рамы для статического расчета

Несущая способность испытанных колонн в заданные моменты времени и соответствующие им статические воздействия представлены на рисунке 13.

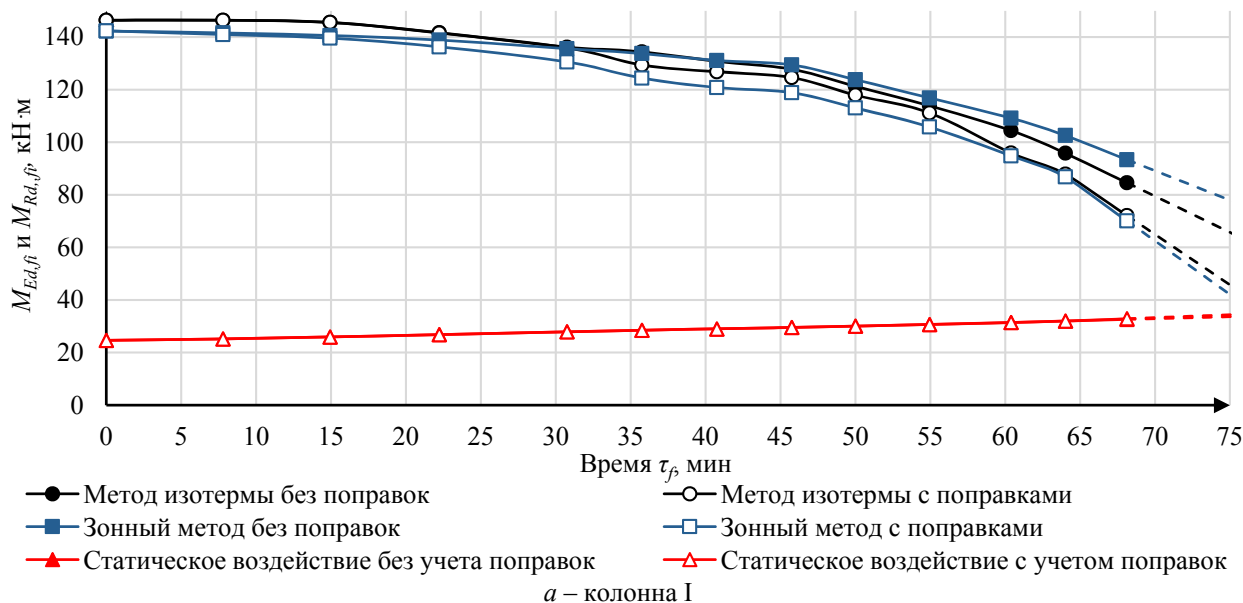


Рисунок 13. – Сопротивление центрифугированных железобетонных колонн и действующие изгибающие моменты на них во время огневых испытаний [9]

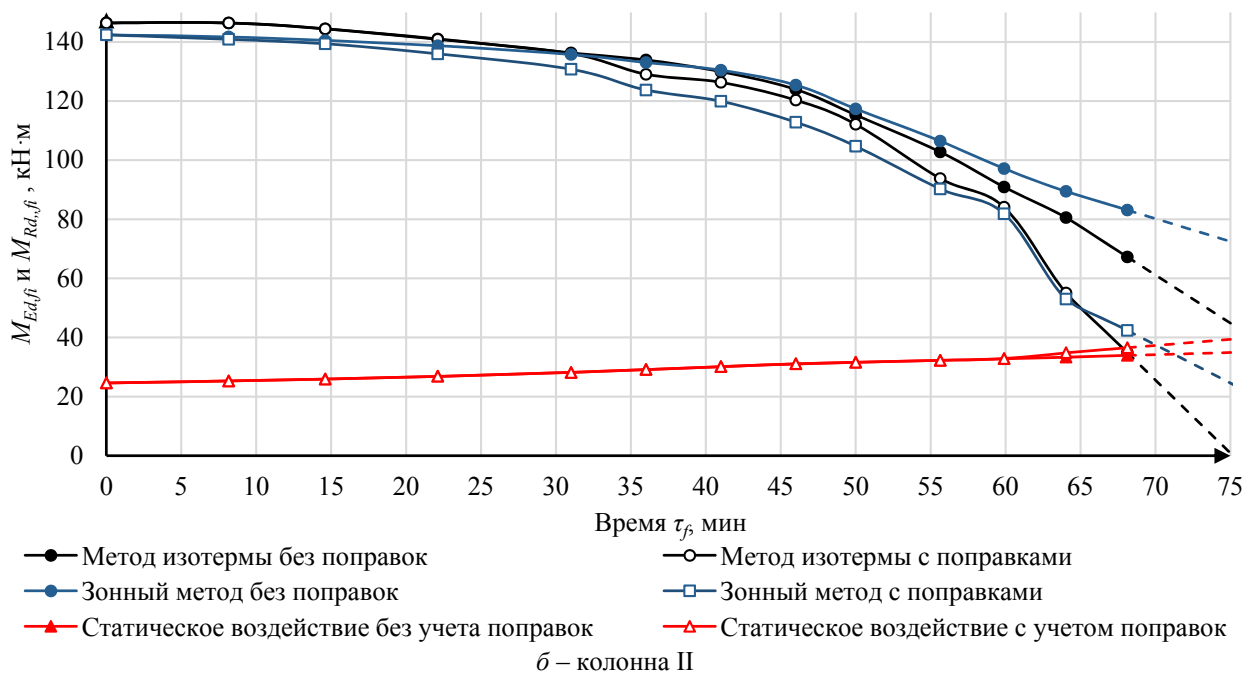


Рисунок 13. – Сопротивление центрифугированных железобетонных колонн и действующие изгибающие моменты на них во время огневых испытаний [9]

Результаты расчетов предела огнестойкости испытанных центрифугированных железобетонных колонн зонным методом и методом изотермы по разработанной методике представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Результаты расчетов предела огнестойкости колонн

Метод расчета (ТНПА, из которого берутся величины, характеризующие изменение механических показателей арматуры и бетона)	Предел огнестойкости, мин		Отклонение результатов расчета от эксперимента, %
	Расчет	Эксперимент	
Зонный метод (ТКП 45-2.02-110)	69,7	75,5	-7,7
Зонный метод (EN 1992-1-2-2009)	78,8		4,4
Метод изотермы (ТКП 45-2.02-110)	66,0		-12,6
Метод изотермы (EN 1992-1-2-2009)	65,7		-13,0

Примечание: знак «-» показывает отклонение в меньшую сторону от эквивалентного экспериментального значения, отсутствие знака – в большую.

Таким образом, зонный метод и метод изотермы 500 °С, в которых учитываются особенности рассматриваемых конструкций, допустимо применять при оценке их огнестойкости.

Заключение

Разработана методика определения пределов огнестойкости железобетонных конструкций, основанная на компьютерном моделировании их прогрева при пожаре, а также моделировании их деформации с учетом изменяющихся свойств бетона и арматуры, что позволило разрабатывать методы повышения огнестойкости современных железобетонных конструкций. Результаты численного моделирования по разработанной методике сопоставлены с экспериментальными данными. Полученные данные рекомендуется использовать для решения задач по оценке огнестойкости строительных конструкций и элементов при проектировании и строительстве зданий и сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полевод, И.И. Огнестойкость изгибаемых железобетонных конструкций из высокопрочного бетона / И.И. Полевод // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2004. – № 5. – С. 65–78.

2. Полевода, И.И. Результаты испытания на огнестойкость железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном / И.И. Полевода, Н.В. Зайнудинова, Н.И. Чайчиц // Вестн. Командн.-инженер. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2016. – № 1 (23). – С. 37–44.
3. Полевода, И.И. Результаты натуральных огневых испытаний центрифугированных железобетонных колонн кольцевого сечения / И.И. Полевода, Д.С. Нехань // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 2. – С. 142–159. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.142.
4. Нехань, Д.С. Инженерная методика расчета пределов огнестойкости сжато-изгибаемых центрифугированных железобетонных конструкций / Д.С. Нехань // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2021. – № 1 (49). – С. 43–55.
5. Полевода, И.И. Решение теплотехнической задачи огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн / И.И. Полевода, Д.С. Нехань // Пожаровзрывобезопасность. – 2021. – Т. 30, № 2. – С. 49–70. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.02.49-70.
6. Касперов, Г.И. Расчетно-экспериментальная методика оценки огнестойкости строительных конструкций из высокопрочного бетона / Г.И. Касперов, И.И. Полевода // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2003. – № 4 (14). – С. 24–32.
7. Касперов, Г.И. Оценка возможности хрупкого разрушения высокопрочного бетона при пожаре / Г.И. Касперов, И.И. Полевода // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. – 2004. – № 1 (25). – С. 132–134.
8. Полевода, И.И. Моделирование поведения железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном в программном комплексе ANSYS / И.И. Полевода, Н.В. Зайнудинова // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1, № 4. – С. 385–391. DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-4.385.
9. Нехань Д.С. Решение статической задачи огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн / Д.С. Нехань, И. И. Полевода // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2021. – № 8. – С. 94–106.
10. Кудряшов, В.А. Результаты натуральных огневых испытаний железобетонного монолитного перекрытия в составе экспериментального фрагмента каркасного здания / В.А. Кудряшов [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2021. – Т. 5, № 1. – С. 49–66. DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-1.49.

**Определение пределов огнестойкости современных строительных конструкций
из железобетона с применением компьютерного моделирования в ANSYS**
**Determination of fire resistance limits for modern reinforced concrete building structures
using computer simulation in ANSYS**

Полевода Иван Иванович

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь»,
начальник университета

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: ip@ucp.by

ORCID: 0000-0003-2469-3553

Ivan I. Palevoda

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Head of University

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: ip@ucp.by

ORCID: 0000-0003-2469-3553

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2022.6-1.42>

DETERMINATION OF FIRE RESISTANCE LIMITS FOR MODERN REINFORCED CONCRETE BUILDING STRUCTURES USING COMPUTER SIMULATION IN ANSYS

Palevoda I.I.

Purpose. To develop a method for determining the fire resistance limits of modern building structures made of reinforced concrete, based on computer simulation of their heating during a fire, as well as on modeling taking into account the changing properties of concrete and reinforcement.

Methods. Theoretical and experimental research methods were applied to solve the set tasks. The finite element method was used to evaluate the fire resistance by the loss of bearing capacity. The theoretical method is based on solving thermophysical and static problems. To assess the fire resistance of modern building structures made of reinforced concrete, it is necessary to know the patterns of their destruction during non-stationary heating, as well as the temperature distributions over the cross section of the structure. To obtain these data, both laboratory and field tests have been carried out.

Findings. The method for determining the fire resistance limits of load bearing function (R) of modern building structures made of reinforced concrete has been developed. This method was realized in software-computer complex ANSYS. Numerical finite element modeling made it possible to determine the fire resistance limit by the loss of bearing capacity and develop methods for improving fire resistance. The results of numerical simulation are compared with experimental data.

Application field of the research. The obtained results can be used in the development of standards for the design and construction of reinforced concrete structures, and the developed methodology can be used to solve problems of assessing the fire resistance of building structures and the elements in the process of the design and construction of buildings and structures, including the framework of existing standards.

Keywords: fire resistance limits, reinforced concrete structures, standard temperature regime, temperature fields, modeling, finite element method.

(The date of submitting: January 14, 2022)

REFERENCES

1. Palevoda I.I. Ognestoykost' izgibaemykh zhelezobetonnykh konstruksiy iz vysokoprochnogo betona [Fire resistance of bent reinforced concrete structures made of high-strength concrete]. *Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya*, 2004. No. 5. Pp. 65–78. (rus)
2. Palevoda I.I., Zainudzinava N.V., Chaychits N.I. Rezul'taty ispytaniya na ognestoykost' zhelezobetonnykh predvaritel'no napryazhennykh plit bez stsepleniya armatury s betonom [The results of the fire test concrete slabs with unbonded reinforcement of the fire resistance]. *Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2016. No. 1 (23). Pp. 37–44.
3. Palevoda I.I., Nekhan' D.S. Rezul'taty naturnykh ognevykh ispytaniy tsentrifugirovannykh zhelezobetonnykh kolonn kol'tseвого secheniya [Results of full-scale fire test of spun reinforced concrete columns of annular section]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4, No. 2. Pp. 142–159. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.142.
4. Nekhan' D.S. Inzhenernaya metodika rascheta predelov ognestoykosti szhato-izgibaemykh tsentrifugirovannykh zhelezobetonnykh konstruksiy [Engineering method of the fire resistance calculation of compressed - bended spun reinforced concrete structures] *Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya*. 2021. – No. 1 (49). Pp. 43–55. (rus)
5. Palevoda I.I., Nekhan' D.S. Resheniye teplotekhnicheskoy zadachi ognestoykosti tsentrifugirovannykh zhelezobetonnykh kolonn [A solution to the thermal problem of the resistance of spun reinforced concrete columns]. *Fire and Explosion Safety*, 2021. Vol. 30. No. 2. Pp. 49–70. (rus). DOI: 10.22227/PVB.2021.30.02.49-70.
6. Kasperov G.I., Palevoda I.I. Raschetno-eksperimental'naya metodika otsenki ognestoykosti stroitel'nykh konstruksiy iz vysokoprochnogo betona [Calculation and experimental method for assessing the fire resistance of building structures made of high-strength concrete]. *Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya*. 2003. No. 4 (14). Pp. 4–32. (rus)
7. Kasperov G.I., Palevoda I.I. Otsenka vozmozhnosti khrupkogo razrusheniya vysokoprochnogo betona pri pozhare [Assessment of the possibility of brittle fracture of high-strength concrete in the fire].

- Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2004. No. 1 (25). Pp. 132–134. (rus)
8. Palevoda I.I., Zainudzinava N.V. Modelirovanie povedeniya zhelezobetonnykh predvaritel'no napryazhennykh plit bez stsepleniya armatury s betonom v programmnom komplekse ANSYS [Modelling of the behavior of concrete slabs with unbonded reinforcement in the ANSYS program complex]. *Journal of Civil Protection*. 2017. Vol.1. No. 4. Pp. 385–391. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-4.385.
 9. Palevoda I.I., Nekhan' D.S. Reshenie staticheskoy zadachi ognestoykosti tsentrifugirovannykh zhelezobetonnykh kolonn [The static analysis problem of fire resistance of spun reinforced concrete columns]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*. 2021. No. 8. Pp. 94–106. (rus)
 10. Kudryashov V.A., Zhamoydik S.M., Kurachenko I.Y., Nguen T.K. Rezul'taty naturnykh ognevykh ispytaniy zhelezobetonnoy monolitnoy perekrytiya v sostave eksperimental'nogo fragmenta karkasnoy zdaniya [Results of full-scale fire tests of the monolithic reinforced concrete slab as part of a fragment of a frame building]. *Journal of Civil Protection*. 2021. Vol. 5, No. 1. Pp. 49–66. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-1.49.