

Оценка несущей способности и эксплуатационной пригодности плиты перекрытия после высокотемпературного воздействия

Анна Николаевна Малахова

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Железобетонные конструкции зданий и сооружений хорошо сопротивляются высокотемпературным воздействиям, но эти воздействия приводят к изменению прочностных и деформационных характеристик материала. Кроме того, для предварительно напряженных конструкций при огневых воздействиях может иметь место потеря предварительного напряжения, которое обеспечивает уменьшение ширины раскрытия трещин и прогиба несущих конструктивных элементов.

Материалы и методы. Приведены и проанализированы результаты аналитических расчетов несущей способности и эксплуатационной пригодности сборной железобетонной предварительно напряженной ребристой плиты перекрытия до и после высокотемпературного огневого воздействия на нее. После воздействия пожара расчеты выполняются при полной потере арматурой предварительного напряжения. Температура прогрева бетона сжатой зоны и растянутой арматуры в расчетном поперечном сечении плиты перекрытия принимается по результатам экспериментальных исследований.

Результаты. Сравнение прогибов плиты перекрытия, полученных расчетным путем и экспериментально, свидетельствует о наличии дополнительных факторов (температурное расширение бетона и арматуры, высокотемпературная ползучесть арматуры), определяющих увеличенное значение экспериментального прогиба плиты перекрытия по сравнению с расчетным. Анализируется конструктивное решение плиты перекрытия, рассматривается целесообразность увеличения площади продольной растянутой арматуры для повышения несущей способности и уменьшения ширины раскрытия трещин в плите. Показано влияние огнезащиты на температуру прогрева бетона сжатой зоны и растянутой арматуры плиты.

Выводы. Сравнение результатов расчета плиты до огневого воздействия и после него показало, что высокотемпературное воздействие привело к потере предварительного напряжения и, как следствие, к значительному увеличению прогиба плиты. В то же время ширина раскрытия трещин увеличилась не столь значительно, так как на ее величину оказывает влияние процент армирования, который при конструировании плиты был увеличен. Несущая способность плиты изменилась незначительно вследствие малого изменения прочностных характеристик бетона и арматуры при достигнутой температуре прогрева материалов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железобетонные конструкции зданий, ребристая плита перекрытия, предварительное напряжение, экспериментальные и аналитические исследования, огневые воздействия, температура прогрева, прочностные и деформационные характеристики материалов, несущая способность, эксплуатационные характеристики конструкций

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Малахова А.Н. Оценка несущей способности и эксплуатационной пригодности плиты перекрытия после высокотемпературного воздействия // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 194–202. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.194-202

Автор, ответственный за переписку: Анна Николаевна Малахова, MalahovaAN@mgsu.ru, malahov@gnext.ru.

Estimation of bearing capacity and serviceability of a floor slab after high-temperature exposure

Anna N. Malahova

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

ABSTRACT

Introduction. Reinforced concrete structures of buildings have significant fire resistance, but high-temperature effects lead to changes in strength and deformation characteristics of concrete and reinforcement of structures. In addition, for prestressed reinforced concrete structures, fire impacts can be associated with partial or even complete loss of prestress. At the same time, it is the prestress of the reinforcement that makes it possible to limit the width of the crack opening and the deflection of reinforced concrete structures within acceptable limits.

Materials and methods. The paper presents and analyzes the results of analytical calculations of the bearing capacity and serviceability of a prestressed reinforced concrete ribbed floor slab before and after high-temperature fire impact on it. After fire exposure, the calculations are carried out with a complete loss of pre-stressing by the reinforcement. The heating temperature of the concrete in the compressed zone and tension reinforcement in the calculated cross section of the floor slab is taken according to the results of experimental studies.

Results. The comparison of the floor slab deflections obtained by calculation and experimentally indicates the presence of additional factors (temperature expansion of concrete and reinforcement, high-temperature creep of reinforcement) that determine the increased value of the experimental floor slab deflection compared to the calculated one. The structural solution of the floor slab is analyzed, the feasibility of increasing the area of longitudinal tensile reinforcement to increase the bearing capacity and reduce the crack opening width in the slab is considered. The effect of fire protection on the heating temperature of the concrete in the compressed zone and the tensile reinforcement of the slab is shown.

Conclusions. An analysis of the results of calculating a prestressed concrete ribbed floor slab before and after a fire showed a slight decrease in its bearing capacity after fire impact, an increase in the width of the crack opening and a significant increase in the deflection of the slab.

KEYWORDS: reinforced concrete building structures, ribbed floor slab, prestress, experimental and analytical studies, fire effects, warm-up temperature, strength and deformation characteristics of materials, load bearing capacity, operational characteristics of structures

FOR CITATION: Malahova A.N. Estimation of bearing capacity and serviceability of a floor slab after high-temperature exposure. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):194-202. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.194-202 (rus.).

Corresponding author: Anna N. Malahova, MalahovaAN@mgsu.ru, malahov@gnext.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Железобетонные конструкции (ЖБК) по сравнению с металлическими или деревянными несущими конструкциями зданий лучшим образом сопротивляются огневым воздействиям, но и они после огневых воздействий могут частично или полностью потерять свою несущую способность и эксплуатационную пригодность, которые определяют возможность их дальнейшей эксплуатации.

Наиболее уязвимыми для огневых воздействий являются изгибаемые статически определимые, быстро прогреваемые из-за малой толщины составных элементов сборные ЖБК и особенно железобетонные конструкции или их элементы с предварительно напряженной арматурой. Рассмотренная в статье сборная железобетонная предварительно напряженная ребристая плита перекрытия относится именно к таким конструкциям.

Для уменьшения прогибов и ширины раскрытия трещин сборные ЖБК выполняются с предварительным напряжением, поэтому снижение или даже потеря его уровня в результате пожара оказывают существенное влияние на эксплуатационные характеристики конструкций.

В СП 329.1325800.2017 «Здания и сооружения. Правила обследования после пожара», СП 468.1325800.2019 «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и ог-

несохранности» приведены рекомендации по определению остаточного уровня предварительного напряжения арматуры с учетом достигнутой степени температурного ее нагрева при пожаре.

Кроме того, нормативные требования касаются ограничения уровня нагрева напрягаемой арматуры до температуры не более 100 °С. Этот показатель исключает потерю арматурой предварительного напряжения и может быть достигнут с помощью конструктивных мероприятий. Для рассматриваемой плиты в качестве конструктивных мероприятий применены газобетонные вкладыши.

Если температура нагрева превышает 100 °С, то предварительное напряжение в арматуре начинает постепенно снижаться, при температуре 210–330 °С оно уменьшается, как это показано в табл. 1, до нуля.

Промежуточный уровень предварительного напряжения арматуры σ_{sp} можно рассчитать по эмпирической формуле:

$$\sigma_{sp} = a - b \cdot t_s,$$

где a , b определяются по табл. 2 и зависят от класса арматуры. При этом сборные конструкции должны быть изготовлены из бетона класса В30 и выше.

Многие научно-технические статьи последних лет посвящены экспериментальным и компьютерным исследованиям ЖБК зданий и сооружений на высокотемпературные воздействия пожара [1–3]. Воздействие пожара на предварительно напряжен-

Табл. 1. Утрата предварительного напряжения для арматуры различных классов

Table 1. Loss of prestress for reinforcement of different classes

Класс арматуры Reinforcement class	A600	A800	A1000	Bp1200–Bp1500, K1400, K1500
Температура утраты предварительного напряжения в арматуре, °С (свыше) Temperature of loss of prestress in reinforcement, °С (over)	210	220	350	330

Табл. 2. Значения коэффициентов a и b для различных классов арматуры

Table 2. Values of coefficients a and b for various classes of reinforcement

Класс арматуры Reinforcement class		A600	A800	A1000	Bp1200–Bp1500, K1400, K1500
Безразмерные коэффициенты Dimensionless coefficients	a	84	87	92	89
	b	0,4	0,39	0,36	0,27

ные ЖБК описывается в трудах [4–7]. При этом актуальным является добавление огневого воздействия при стандартном расчете пространственной модели «здание – основание».

Ценность экспериментальных исследований поведения ЖБК в условиях пожара возрастает при проведении испытаний не отдельных конструкций, а конструкций в составе фрагмента здания, так как в этом случае возможна оценка степени вовлеченности конструктивных элементов здания в работу в условиях высокотемпературных воздействий.

В работах [8–10] приводятся аналитические расчеты несущих конструкций зданий на огневые воздействия.

Для уменьшения температуры прогрева бетона и арматуры в научно-технической литературе рассматриваются различные огнезащитные материалы и покрытия [11, 12].

Исследователи отмечают, что повышение предела огнестойкости ЖБК может быть достигнуто за счет применения термостойких бетонов [13].

Изменение прочностных характеристик бетона при увеличении температуры огневого воздействия зависит от вида бетона, вида заполнителя и условий твердения бетона. Для строительных конструкций из бетона с гранитным заполнителем снижение прочности бетона на сжатие после пожара в соответствии с СП 13-102–2003 при последовательном увеличении температуры нагрева бетона свыше 200, 300, 400, 500 °С соответственно составляет 30, 40, 60, 70 %.

При этом, начиная с нагрева выше 300 °С, развивается процесс трещинообразования, с нагрева свыше 500 °С образуются глубокие трещины, а при нагреве свыше 700–800 °С возникают отколы бетона, обнажающие в ряде случаев арматуру. При нагреве бетона свыше 500 °С значение его прочности принимается равным нулю.

В публикации [14] приводится сравнение несущей способности колонн и плит перекрытия при применении класса бетона В20, В40, В50 с органоминеральными добавками. Показано, что увеличение класса бетона значительно влияет на несущую способность колонн, в то время как для плит потеря несущей способности определяется достижением рабочей арматурой критической температуры нагрева.

Существует связь между потерей несущей способности несущих ЖБК при пожаре с категорией их технического состояния до пожара [15, 16].

В работе [17] изложены результаты исследований физико-механических свойств современной арматуры, что позволяет использовать арматурный прокат различных классов прочности и способов производства с гарантированной огнестойкостью железобетонных конструкций. Показано [18], что если несущая способность железобетонных балок при их эксплуатации была снижена на 25 %, то первоначальное значение их огнестойкости будет снижено на 50 %. Предлагается добавить в нормы рекомендации по оценке огнестойкости строительных конструкций в зависимости от их технического состояния [19]. Изучается влияние высоких температур на надежность ЖБК [20].

Несущая способность строительной конструкции, как и ее деформационные и эксплуатационные характеристики, играет определяющую роль в решении вопроса о возможности ее дальнейшей эксплуатации. Однако в большинстве научных трудов, посвященных исследованию работы строительных конструкций в ходе высокотемпературного воздействия, как правило, рассматривается только определение предела огнестойкости конструкции и ее прогибов. Вопросы, связанные с изучением и расчетом остаточной несущей способности конструкции, подвергшейся огневому воздействию, оценка изменения ее деформационных и эксплуатационных характеристик часто оказываются за рамками научных исследований.

В настоящей работе выполнены расчеты несущей способности, ширины раскрытия трещин и прогибов сборной железобетонной предварительно напряженной плиты перекрытия до и после огневого воздействия на нее, а также приведено сравнение этих расчетов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки несущей способности и эксплуатационной пригодности ЖБК после пожара необходимо иметь сведения о температуре нагрева материалов в различных зонах конструкций, прочностных и деформационных характеристиках бетона и арматуры, соответствующих этому прогреву, а также владеть информацией об уровне предварительного напряжения арматуры и его потере после пожара.

Величина температурного прогрева бетона и арматуры различных зон исследуемой железобетонной конструкции может устанавливаться на ос-

новании теплотехнического расчета с помощью современных программных комплексов.

Для упрощенного теплотехнического расчета могут быть использованы изотермы прогрева типовых сечений ЖБК (плит, стенок, балок, колонн) при одно-, двух-, трех-, четырехстороннем нагреве в зависимости от длительности воздействия пожара, приведенные в СП 468.1325800.2019.

Могут проводиться для железобетонных элементов зданий лабораторные испытания на огневые воздействия с определением температуры прогрева бетона и арматуры. Для этого в различных зонах исследуемых конструкций устанавливаются термоэлектрические преобразователи (ТЭП).

С целью выполнения исследований, направленных на оценку несущей способности и эксплуатационной пригодности сборных ЖБК с предварительно напряженной арматурой, подвергнутых высокотемпературному воздействию, выбрана предварительно напряженная железобетонная ребристая плита перекрытия.

В качестве исходных данных для поверочного расчета сборной железобетонной предварительно напряженной ребристой плиты перекрытия приняты результаты испытаний, проведенных в испытательной лаборатории Института комплексной безопасности в строительстве НИУ МГСУ [21]. Экспериментально были определены температура нагрева отдельных зон указанной плиты перекрытия и изменение ее прогиба в ходе высокотемпературного воздействия.

Сборная железобетонная ребристая плита перекрытия имела следующие размеры: длина — 6260 мм, ширина — 2980, толщина — 180 мм. Плита опиралась на две короткие противоположные стороны. Расчетный пролет l_0 плиты перекрытия — 6,1 м.

Для плиты использован тяжелый бетон класса В40. Нижняя продольная ненапрягаемая арматура представлена шестью стержнями Ø16-A500 ($A_s =$

$= 12,06 \text{ см}^2$). Расстояние от нижней растянутой грани плиты до центра тяжести арматуры a составило 60 мм. Нижняя продольная напрягаемая арматура плиты — пятнадцать канатов Ø12-K1500 ($A_s = 13,59 \text{ см}^2$) при $a = 45 \text{ мм}$. Начальный уровень предварительного напряжения арматуры σ_{sp} при механическом способе натяжения составил 1040 МПа. Предварительное напряжение арматуры σ_{sp} с учетом всех потерь составило $1040 - 327,2 = 712,8 \text{ МПа}$, усилие обжатия $P = A_{sp} \cdot \sigma_{sp} = 13,59 \cdot 10^{-4} \cdot 712,8 \times 10^3 = 968,7 \text{ кН}$.

На рис. 1 приведены общий вид и схема армирования ребристой плиты перекрытия. Плита снабжена элементами огнезащиты (газобетонные вкладыши, класс по прочности на сжатие В2,5; марка по средней плотности D400), которые призваны уменьшить температуру прогрева бетона и арматуры и, как следствие, степень влияния огневого воздействия на прочностные характеристики бетона и арматуры, в том числе на уровень предварительного напряжения в арматуре.

При проведении экспериментов к плите прикладывалась нагрузка $7,0 \text{ кН/м}^2$. Расчетное значение нагрузки было принято $8,05 \text{ кН/м}^2$ при коэффициенте надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,15 \cdot (7,0 \cdot 1,15 = 8,05 \text{ кН/м}^2)$. Пониженное нормативное значение — $6,02 \text{ кН/м}^2$ при доле длительности $0,86 \times (7,0 \cdot 0,86 = 6,02 \text{ кН/м}^2)$.

При выполнении экспериментальных исследований образец подвергался равномерному нагреву по нижней поверхности на всей длине пролета. Максимальная температура нагрева арматуры при пожаре составила $360 \text{ }^\circ\text{C}$.

В ходе эксперимента температура нагрева бетона сжатой зоны и стержней рабочей продольной напрягаемой и ненапрягаемой арматуры определена с применением 12 ТЭП, размещенных в различных зонах плиты.



Рис. 1. Общий вид и схема армирования сборной предварительно напряженной железобетонной ребристой плиты перекрытия

Fig. 1. General view and reinforcement scheme of a prestressed reinforced concrete ribbed floor slab

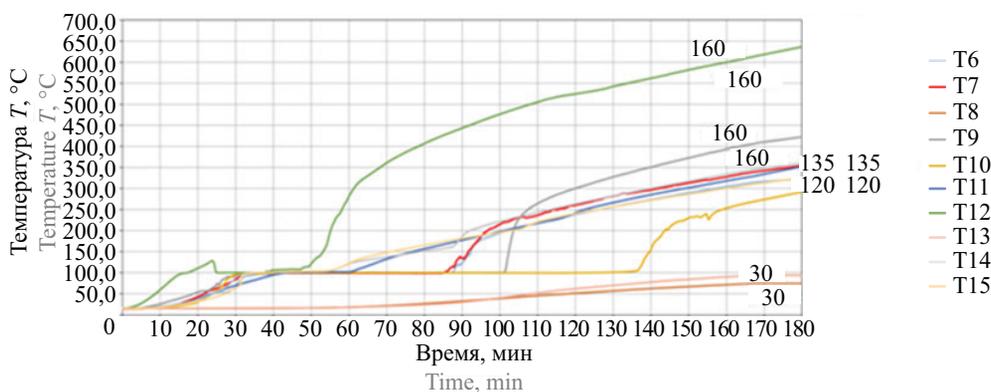


Рис. 2. График зависимости температуры, °С, бетона сжатой зоны лабораторного образца плиты (на глубине 30 мм от верхней поверхности плиты); температуры напрягаемой арматуры (на глубине 135 мм от верхней поверхности плиты) и ненапрягаемой (на глубине 120 мм от верхней поверхности плиты), а также бетона растянутой зоны (на глубине 160 мм) в зависимости от времени теплового воздействия, мин, при проведении эксперимента

Fig. 2. Graph of temperature dependence, °C, of the concrete in the compressed zone of the laboratory slab specimen (at a depth of 30 mm from the top surface of the slab); temperature of prestressed reinforcement (at a depth of 135 mm from the top surface of the slab) and non-tensioned reinforcement (at a depth of 120 mm from the top surface of the slab), as well as concrete of the tension zone (at a depth of 160 mm) depending on the time of thermal exposure, min, during the experiment

На рис. 2 представлен график зависимости температуры нагрева материалов плиты в местах расположения ТЭП в зависимости от времени теплового воздействия.

Сборная железобетонная предварительно напряженная ребристая плита является несущим элементом перекрытия в составе конструктивной системы крупнопанельного здания. В соответствии с СП 335.1325800.2017 «Крупнопанельные конструктивные системы. Правила проектирования» допускается выполнение расчета отдельно плиты перекрытия.

Расчетная схема плиты представляла собой статически определимую балку с двумя шарнирными опорами и равномерно распределенной нагрузкой. Значения расчетного, нормативного и нормативного длительного момента приняты следующие: $M = 111,6$ кНм, $M_n = 97,0$ кНм, $M_m = 83,4$ кНм.

Определение несущей способности, ширины раскрытия трещин и деформаций плиты перекрытия выполнены в соответствии с СП 63.13330.2018 «Бе-

тонные и железобетонные конструкции. Основные положения». При выполнении расчетов плиты после пожара прочностные и деформационные характеристики материалов, а также уровень предварительного напряжения арматуры принимались с учетом рекомендаций, приведенных в СП 329.1325800.2017.

В табл. 3 представлены коэффициенты, которые в зависимости от температуры прогрева бетона сжатой зоны и нижней продольной арматуры плиты должны вводиться к прочностным и деформационным характеристикам материалов.

Предварительное напряжение арматуры класса K1500 при температуре прогрева 330 °С считается утраченным.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 4 приведены результаты расчета сборной железобетонной предварительно напряженной ребристой плиты перекрытия до и после высокотем-

Табл. 3. Коэффициенты к прочностным и деформационным характеристикам материалов в зависимости от температуры прогрева сжатой зоны и нижней продольной арматуры плиты

Table 3. Coefficients for the strength and deformation characteristics of materials depending on the heating temperature of the compressed zone and the lower longitudinal reinforcement of the slab

Материалы для плиты перекрытия Materials for the floor slab	Бетон тяжелый класса В40 Heavy concrete class B40	Арматура класса А500 Reinforcement of class A500	Арматура класса K1500 Reinforcement of class K1500
Температура прогрева Warm-up temperature	100 °С	360 °С	360 °С
Коэффициенты к прочностным характеристикам Coefficients for strength characteristics	0,98	1,0	0,95
Коэффициенты к деформационным характеристикам Coefficients for deformation characteristics	0,85	0,99	0,84

Табл. 4. Результаты расчета сборной железобетонной предварительно напряженной ребристой плиты перекрытия до и после высокотемпературного огневого воздействия

Table 4. The results of the calculation of a concrete prestressed ribbed floor slab before and after high-temperature fire exposure

Характеристики Characteristics	Несущая способность по моменту, кНм Load bearing capacity by moment, kNm	Ширина раскрытия трещин a_{crc} , мм Crack opening width a_{crc} , mm		Прогиб f , см Deflection f , cm
		кратковременная short-term	длительная long-term	
До пожара Before the fire	257,6	0	0	1,1
После пожара After the fire	243,4	0,35	0,28	12,5

пературного огневого воздействия на нее, в результате которого имели место уменьшение прочностных и деформационных характеристик бетона и арматуры и полная утрата предварительного напряжения нижней продольной арматуры класса K1500.

Анализ результатов расчетов плиты до и после пожара (табл. 4) показывает незначительное снижение ее несущей способности (на 5,5 %). При этом плита обладает значительным запасом прочности по несущей способности ($M = 243,4 \text{ кНм} < 111,6 \text{ кНм}$).

Увеличение ширины раскрытия трещин после пожара связано с полной утратой предварительного напряжения арматуры и уменьшением прочностных и деформационных характеристик материалов плиты. Как показано в табл. 4, трещины с шириной длительного и кратковременного раскрытия соответственно составляют: $a_{crc} = 0,28 \text{ мм} > 0,2 \text{ мм}$ и $a_{crc} = 0,35 \text{ мм} > 0,3 \text{ мм}$. Превышение допустимых значений ширины кратковременного и длительного раскрытия трещин соответственно — на 40 и 17 %.

Прогиб плиты f по расчету составил 12,5 см и существенно, в 4,2 раза, превысил предельно допустимое значение f_{ult} , равное 3,0 см.

Следует отметить, что, кроме прогиба плиты под нагрузкой, может иметь место дополнительный прогиб, связанный с температурным расширением бетона и арматуры у нижней нагреваемой поверхности плиты, а также с проявлением высокотемпературной ползучести арматуры.

Конструктивное решение исследуемой сборной железобетонной предварительно напряженной ребристой плиты перекрытия было направлено на снижение температуры прогрева материалов плиты при возможном высокотемпературном воздействии пожара посредством установки в межреберном пространстве плиты огнезащиты в виде газобетонных вкладышей (класс по прочности на сжатие B2,5; марка по средней плотности D400). В ходе проведения эксперимента и после его завершения газобетонные вкладыши сохранили свое проектное положение и не получили видимых повреждений.

По результатам выполненного расчета плиты перекрытия можно сделать вывод, что увеличение

площади поперечного сечения нижней продольной арматуры при проектировании плиты оказало влияние на увеличение несущей способности по моменту в 2,3 раза, а после пожара несущая способность снизилась только на 5,5 %. Потеря предварительного напряжения арматуры сказалась на увеличении ширины раскрытия трещин, но, так как нижняя продольная арматура плиты была поставлена с запасом, это, в свою очередь, привело к уменьшению напряжения в арматуре и соответственно к уменьшению ширины раскрытия трещин. Поэтому окончательное превышение ширины раскрытия трещин против допустимого значения было не столь значительным. Прогиб плиты перекрытия после огневого воздействия оказался существенным, в 4,2 раза превышающим предельно допустимое значение, что связано с полной потерей предварительного напряжения в арматуре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение результатов расчета сборной железобетонной ребристой плиты перекрытия до и после пожара показало незначительное снижение ее несущей способности (на 5,5 %), увеличение ширины раскрытия трещин против допустимого (длительного раскрытия трещин — на 40 % и кратковременного раскрытия трещин — на 17 %), а также существенное (в 4,2 раза против допустимого) увеличение прогиба плиты перекрытия, что свидетельствует о сохранении несущей способности и снижении эксплуатационной пригодности плиты.

Размещение огнезащитных газобетонных вкладышей в межреберном пространстве плиты привело к снижению температуры нагрева материалов при пожаре, но не предотвратило потерю предварительного напряжения в арматуре.

Увеличение процента армирования при конструировании сборной железобетонной предварительно напряженной ребристой плиты перекрытия позволяет при полной потере предварительного напряжения в арматуре плиты уменьшить ширину раскрытия трещин, но мало сказывается на прогибе плиты, который может стать основной причиной невозможности ее дальнейшей эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ефрюшин С.В., Юрьев В.В.* Численное моделирование огнестойкости железобетонной плиты с помощью программного комплекса ANSYS // *Строительная механика и конструкции*. 2019. № 4 (23). С. 86–92. EDN AQXAQL.
2. *Кудряшов В.А., Жамойдик С.М., Кураченко И.Ю., Неуен Т.К.* Результаты натурных огневых испытаний железобетонного монолитного перекрытия в составе экспериментального фрагмента каркасного здания // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2021. Т. 5. № 1. С. 49–66. DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-1.49. EDN EODTXX.
3. *Мкртычев О.В., Сидоров Д.С.* Расчет железобетонного здания на температурные воздействия // *Вестник МГСУ*. 2012. № 5. С. 50–55.
4. *Полева И.И., Зайнудинова Н.В.* Огнестойкость изгибаемых железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2018. Т. 2. № 2. С. 161–167. EDN XPAXHF.
5. *Полева И.И., Зайнудинова Н.В.* Моделирование поведения железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном в программном комплексе ANSYS // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2017. Т. 1. № 4. С. 385–391. EDN ZRKOZD.
6. *Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В.* Экспериментальные и аналитические исследования несущей способности большепролетных железобетонных балок при огневом воздействии // *Пожаровзрывобезопасность*. 2015. Т. 24. № 11. С. 31–38. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.11.31-38
7. *Ильин Н.А., Панфилов Д.А.* Особенности определения огнестойкости многопустотных преднапряженных железобетонных плит перекрытий зданий // *Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Естественные науки и техносферная безопасность* : сб. ст. 2017. С. 231–238. EDN YQLMID.
8. *Кудряшов В.А., Кураченко И.Ю.* Аналитическая оценка несущей способности изгибаемых железобетонных конструкций после пожара // *Судебная экспертиза Беларуси*. 2018. № 1 (6). С. 56–60. EDN NVKKDR.
9. *Зайцев А.М., Никулин А.В.* Анализ возможности эксплуатации железобетонных ферм после пожара // *Пожаровзрывобезопасность*. 2004. Т. 13. № 4. С. 66–71.
10. *Духов Д.Г., Клецунов Я.Я., Колгудаев А.Н.* Особенности обследования зданий после пожара // *Ceteris Paribus*. 2015. № 4. С. 21–26. EDN UNRXYN.
11. *Плотников Д.А., Башиева Т.С., Новиков Н.С.* Характер воздействия пожаров на элементы железобетонных конструкций и средства их огнезащиты // *Вестник Института гражданской защиты Донбасса*. 2016. № 1 (5). С. 14–21. EDN YTLEJC.
12. *Жувак О.В., Рыбаков В.А., Сергеева Ф.А.* Огнестойкость железобетонных конструкций с применением различных огнезащитных покрытий // *Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения* : мат. Всерос. науч.-техн. конф. 2021. С. 51–56. EDN QSSFJG.
13. *Левашов Н.Ф., Акулова М.В., Потемкина О.В., Соколова Ю.А.* Разработка аналитической модели потери прочности цементных композитов при воздействии повышенных температур // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 5. С. 104–111.
14. *Загоруйко Т.В., Леденев А.А., Мацюрак Б.К.* Определение огнестойкости железобетонных конструкций с учетом изменения свойств бетона // *Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. 2018. № 1 (9). С. 143–145. EDN XSLVWP.
15. *Загоруйко Т.В., Леденев А.А., Перцев В.Т.* К вопросу огнестойкости железобетонных изделий и конструкций // *Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. 2016. № 1–1 (7). С. 227–230. EDN WDHLND.
16. *Данилов Р.А.* Коррозия как фактор снижения огнестойкости железобетонных конструкций // *Проблемы техносферной безопасности* : мат. Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. 2022. № 11. С. 137–141. EDN PXUPIH.
17. *Кузнецова И.С., Суриков И.Н., Востров М.С., Саврасов И.П.* Исследование физико-механических свойств арматуры современного производства при высокотемпературном нагреве и охлаждении // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 12. С. 18–23. EDN XISIIYX.
18. *Приступок Д.Н., Фёдоров В.Ю., Данилов Р.А.* Исследование утраты огнестойкости эксплуатируемых железобетонных ригелей и балок // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2022. Т. 6. № 3. С. 278–293. DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-3.278. EDN AWIKFF.
19. *Ройтман В.М., Приступок Д.Н., Фёдоров В.Ю.* Метод оценки пределов огнестойкости железобетонных конструкций // *Ройтмановские чтения* : сб. мат. VII науч.-практ. конф. 2019. С. 34–38. EDN UDGUCI.
20. *Тамразян А.Г., Звонов Ю.Н.* К оценке надежности железобетонных плоских безбалочных плит перекрытий на продавливание при действии сосредоточенной силы в условиях высоких температур // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 7. С. 24–28. EDN WHKJTR.
21. *Портнов Ф.А., Ковалева С.А.* Состояние и перспективы развития вопроса оценки огнестойкости железобетонных конструкций // *Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова*. 2020. № 2 (54). С. 133–139. EDN BLEECI.

Поступила в редакцию 27 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 12 ноября 2023 г.

Одобрена для публикации 15 ноября 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: Анна Николаевна Малахова — кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0003-0203-0193; MalahovaAN@mgsu.ru, malahov@gnext.ru.

REFERENCES

1. Efrushin S.V., Yuriev V.V. Numerical modeling of fire resistance of reinforced concrete plate using ansys software complex. *Structural Mechanics and Structures*. 2019; 4(23):86-92. EDN AQXAQL. (rus.).
2. Kudryashov V.A., Zhamoydik S.M., Kurachenko I.Yu., Nguen T.K. Results of full-scale fire tests of the monolithic reinforced concrete slab as part of a fragment of a frame building. *Vestnik of the University of Civil Protection of the MES of Belarus*. 2021; 5(1):49-66. DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-1.49. EDN EODTXX. (rus.).
3. Mkrtychev O.V., Sidorov D.S. Calculation of a reinforced concrete building for temperature effects. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 5:50-55. (rus.).
4. Palevoda I., Zainudzinava N. Fire resistance of binding prestressed concrete slab with unbonded reinforcement. *Vestnik of the University of Civil Protection of the MES of Belarus*. 2018; 2(2):161-167. EDN XPAXHF. (rus.).
5. Palevoda I., Zainudzinava N. Modelling of the behavior of concrete slabs with unbonded reinforcement in the ANSYS program complex. *Vestnik of the University of Civil Protection of the MES of Belarus*. 2017; 1(4):385-391. EDN ZRKOZD. (rus.).
6. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Experimental and analytical studies of the bearing capacity long-span reinforced concrete during fire exposure. *Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(11):31-38. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.11.31-38 (rus.).
7. Ilyin N.A., Panfilov D.A. Features of determining the fire resistance of multi-hollow prestressed reinforced concrete floor slabs of buildings. Traditions and innovations in construction and architecture. *Natural sciences and technosphere safety*. 2017; 231-238. EDN YQLMID. (rus.).
8. Kudryashov V.A., Kurachenko I.Yu. Analytical evaluation of the load-bearing capacity of bendable reinforced concrete structures after fire. *Forensic Examination of Belarus*. 2018; 1(6):56-60. EDN NVKKDR. (rus.).
9. Zaitsev A.M., Nikulin A.V. Possible exploitation of reinforced forms after fire. *Fire and Explosion Safety*. 2004; 13(4):66-71. (rus.).
10. Dukhov D.G., Kleschunov Ya.Ya., Kolgudaev A.N. Peculiarities of surveying buildings after a fire. *Ceteris Paribus*. 2015; 4:21-26. EDN UNRXYH. (rus.).
11. Plotnikov D.A., Bashevaya T.S., Novikov N.S. Character of effect of fires on reinforced concrete structures and review existing fire protection means. *Bulletin of the Institute of Civil Protection of Donbass*. 2016; 1(5):14-21. EDN YTLEJC. (rus.).
12. Zhuvak O.V., Rybakov V.A., Sergeeva F.A. Fire resistance of reinforced concrete structures with the use of various fireproof coatings. *Problems of ensuring the functioning and development of ground infrastructure of weapon system complexes : materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference*. 2021; 51-56. EDN QSSFJG. (rus.).
13. Levashov N.F., Akulova M.V., Potemkina O.V., Sokolova Y.A. Analytical model of strength decreasing of cement composites exposed high temperatures. *Building and Reconstruction*. 2018; 5:104-111. (rus.).
14. Zagoruiko T.V., Ledenev A.A., Matsyurak B.K. Determination of the fire resistance of reinforced concrete structures, taking into account changes in the properties of concrete. *Modern technologies for ensuring civil defense and liquidation of consequences of emergency situations*. 2018; 1(9):143-145. EDN XSLVWP. (rus.).
15. Zagoruiko T.V., Ledenev A.A., Pertsev V.T. On the issue of fire resistance of reinforced concrete products and structures. *Modern technologies for civil defense and liquidation of consequences of emergency situations*. 2016; 1-1(7):227-230. EDN WDHLND. (rus.).
16. Danilov R.A. Corrosion as a factor of reducing the fire resistance of reinforced concrete structures. *Problems of technosphere safety : materials of the international scientific-practical conference of young scientists and specialists*. 2022; 11:137-141. EDN PXUPIH. (rus.).
17. Kuznecova I.S., Surikov I.N., Vostrov M.S., Savrasov I.P. Research in physical-mechanical properties of reinforcement of modern production at high temperatures of heating and cooling. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 12:18-23. EDN XISIYX. (rus.).
18. Pristupyuk D.N., Fedorov V.Yu., Danilov R.A. The study of the loss of fire resistance of the reinforced concrete crossbars and beams in operation. *Vestnik of the University of Civil Protection of the MES*

of Belarus. 2022; 6(3):278-293. DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-3.278. EDN AWIKFF. (rus.).

19. Roitman V.M., Pristupyuk D.N., Fedorov V.Yu. Method for assessing the fire resistance limits of reinforced concrete structures. *Roytman Readings : collection of materials of the VII scientific and practical conference*. 2019; 34-38. EDN UDGUI. (rus.).

20. Tamrazyan A.G., Zvonov Yu.N. To assessing the reliability reinforced concrete flat slabs for punching

under the action of concentrated force at high temperatures. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 7:24-28. EDN WHKJTR. (rus.).

21. Portnov F.A., Kovaleva S.A. State and prospects of development of the issue of evaluation of fire resistance of reinforced concrete structures. *Proceedings of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov*. 2020; 2(54):133-139. EDN BLEECI. (rus.).

Received August 27, 2023.

Adopted in revised form on November 12, 2023.

Approved for publication on November 15, 2023.

B I O N O T E S : **Anna N. Malahova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0203-0193; MalahovaAN@mgsu.ru, malahov@gnext.ru.