

К оценке резервов несущей способности железобетонных плит в условиях пожара

© А. Г. Тамразян¹, Ю. Н. Звонов^{2✉}

- ¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)
² ООО “ПИК-Проект” (Россия, 123022, г. Москва, ул. Красная Пресня, 24)

РЕЗЮМЕ

Введение. Отмечена актуальность понимания механизмов формирования напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций в условиях пожара. Выявлена необходимость учета расчетной ситуации, при которой аварийное высокотемпературное воздействие прикладывается по верхней грани железобетонной плиты. Обозначена связь работоспособности железобетонного сечения, обогреваемого по верхней грани, с изменением полезной нагрузки в процессе развития пожара вследствие ее выгорания. Целью работы является получение расчетной методики, позволяющей оценить зависимость отказа конструкции от изменяющейся полезной нагрузки и определить резервы несущей способности сечения конструкции.

Теоретические положения исследования. Приведен аналитический вывод зависимости силовой нагрузки от времени развития пожара, его температуры, а также низшей рабочей теплоты сгорания помещений. Вывод аналитической зависимости выполнен через эквивалент сгорания массы древесины к силовой нагрузке.

Результаты и их обсуждение. На основании предложенных зависимостей проведены численные расчеты для административного здания. Приведены графики зависимости уменьшения нагрузки от времени пожара и его температуры. Расчетами установлено, что в административных зданиях через 60 мин с момента начала пожара силовая нагрузка на несущие конструкции уменьшается не менее чем на 420 Н/м². С учетом полученных зависимостей установлено, что резервы несущей способности железобетонных плит перекрытий достигают не менее 79 мин при учете убывания нагрузки, изменяющейся во времени, по сравнению с постоянной нагрузкой.

Заключение. Сделан вывод о том, что при моделировании высокотемпературного загружения по верхней грани железобетонных плит перекрытий целесообразно учитывать уменьшение нагрузки вследствие ее выгорания. Это позволит учитывать дополнительные резервы несущей способности железобетонных плит при пожаре.

Ключевые слова: огнестойкость железобетонных плит; стандартный температурный режим пожара; изменение полезной нагрузки; пожарная нагрузка; силовая нагрузка; скорость изменения изгибающих моментов; теплотехническая задача; изотерма пятьсот градусов; запасы прочности железобетонного сечения.

Для цитирования: Тамразян А. Г., Звонов Ю. Н. К оценке резервов несущей способности железобетонных плит в условиях пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. – 2020. – Т. 29, № 2. – С. 26–33. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.26-33.

✉ Звонов Юрий Николаевич, e-mail: zvonovyn@mail.ru

To the estimation of emergency bearing capacity of reinforced slabs in the case of fire

© Ashot G. Tamrazyan¹, Yuriy N. Zvonov^{2✉}

- ¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering
(Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)
² ООО “ПИК-Проект” (Krasnaya Presnya St., 24, Moscow, 123022, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The relevance of understanding the mechanisms of formation of the stress-strain state of reinforced concrete structures in fire conditions is noted. The need to take into account the design situation in which an emergency high-temperature effect is applied along the upper face of a reinforced concrete slab is highlighted. The connection between the performance of a reinforced concrete section heated along the upper face and the change in the payload during the development of a fire due to its burnout is indicated. The aim of the work is to obtain a calculation methodology that allows us to assess the dependence of structural failure on a changing payload and determine the reserves of the bearing capacity of the structural section.

Theoretical theses of research. There is given the analytical conclusion about the dependence of the forced loading value on the fire timing, its temperature and the lowest working combustion heat value within building. The conclusion about the analytical dependence is carried out using the equivalent of wood-pulp combustion to the forced loading.

Results and discussion. On the basis of the presented dependences there numerous calculations for an administrative building were carried out. Graphs showing the dependence of forced loading decrease on fire timing and its temperature are given. The calculation showed that in administrative buildings in 60 minutes after the fire starts the forced loading decrease on the bearing structures reaches not less than 420 H/m^2 . Taking into account the above dependences, it was determined that the emergency bearing capacity of reinforced stabs is reached in 79 minutes considering the forced loading decrease changing in time compared with the constant load.

Conclusion. There was drawn a conclusion that while modeling a high temperature loading on the upper boarder of reinforced slab floors and coverings, it's advisable to consider the decrease of forced loading because of its destruction by fire. It will allow to include additional reserves of load bearing capacity of reinforced stabs in case of fire.

Keywords: fire resistance of reinforced concrete slabs; standard temperature regime of fire; change in payload; fire load; forced loading; rate of change of bending moments; heat engineering problem; isotherm five hundred degrees; safety margins of reinforced concrete section.

For citation: A. G. Tamrazyan, Yu. N. Zvonov. To the estimation of emergency bearing capacity of reinforced slabs in the case of fire. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 2, pp. 26–33 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.26-33.

✉ Yuriy Nikolaevich Zvonov, e-mail: zvonovyn@mail.ru

Введение

Анализ и прогнозирование формирования напряженно-деформированного состояния железобетонного сечения под действием высоких температур в процессе пожара позволяют обеспечить безаварийную работу конструкций зданий и сооружений при наиболее эффективном использовании работы сечения и наименьшей материалоемкости. Важным фактором, вносящим существенный вклад в фактическую работу конструкции, является полезная нагрузка, обуславливающая величины нагрузочных эффектов (изгибающих моментов, поперечных сил).

В основе действующих нормативных документов (ГОСТ 30247.1–94 “Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции”; СТО 36554501-006–2006 “Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций”; СП 329.1325800.2017 “Здания и сооружения. Правила обследования после пожара”), а также проведенных исследований [1–9] лежит гипотеза приложения и воздействия высокой температуры пожара на нижнюю грань конструкции плит перекрытий и покрытий. Возможность высокотемпературного обогрева верхней поверхности плит перекрытий и покрытий не рассматривается. Однако вероятность подобного воздействия в условиях пожара, несмотря на наличие отделочных слоев, которые нередко не являются огнеупорными, высока (как показывают технические отчеты* по обследованию конст-

рукций после пожара), что зачастую может приводить к критическим последствиям.

Высокотемпературное воздействие пожара на верхнюю грань плиты перекрытия особенно актуально для монолитных железобетонных зданий и сооружений с каркасной конструктивной системой [10–12]. Наличие жестких узлов сопряжений элементов каркаса обуславливает большие опорные моменты и рабочее армирование по верхней грани железобетонных плит перекрытий. Немаловажным фактором, влияющим на обеспечение безопасности зданий и сооружений с монолитным железобетонным каркасом и плоскими безбалочными плитами перекрытий, является продавливание, т. е. работа плит на действие поперечной силы и изгибающего момента [13, 14].

Вопрос высокотемпературных воздействий на верхнюю грань железобетонных плит также актуален при рассмотрении работы статически определимых конструкций. Наступление предельного состояния по несущей способности плит перекрытий из железобетона происходит вследствие нагрева сжатой зоны бетона сечения [15].

Однако, как показывает анализ последствий реальных пожаров, при моделировании нагружения высокотемпературным воздействием верхней грани конструкции в расчетах несущей способности целесообразно учитывать возможность уменьшения силовой нагрузки в ходе развития пожара, что позволяет более достоверно прогнозировать ресурсы работы конструкции в условиях аварийной ситуации.

Целью настоящей работы является вывод аналитического решения, описывающего алгоритмы изменения силовой нагрузки в ходе пожара, анализ и оценка вклада изменяющейся полезной нагрузки в резервы несущей способности железобетонных плит при обогреве верхней грани.

Теоретические положения исследования

Уменьшение силовой нагрузки напрямую связано с пожарной нагрузкой. Пожарная нагрузка в по-

* Технический отчет “Результаты визуального, инструментального обследования и поверочных расчетов железобетонных конструкций, поврежденных пожаром, многофункционального гостиничного комплекса, по адресу: г. Москва, ул. Новокосинская, вл. 18”, выполненный ООО “Топгемониторинг” в 2015 г.; Технический отчет “Результаты обследования и конструктивных расчетов железобетонных конструкций после пожара объекта: “Многоэтажный жилой дом с встроенным и пристроенными нежилыми помещениями общественного назначения. Корпус 7”, по адресу: г. Москва, проезд Высоковольтный, вл. 21, выполненный ООО “НИИПТЭС” в 2019 г.

мешениях зданий и сооружений складывается из постоянной (материалы, из которых состоят строительные конструкции, — горючие и трудногорючие; конструкция полов, кровель, подвесных потолков и т. п.), и временной длительной (стационарное оборудование, сырье, готовая продукция, мебель и т. п.).

Известно [15–18], что удельной приведенной пожарной нагрузкой (т. е. нагрузкой, отнесенной к площади пола помещения) называют нагрузку, исчисляемую в эквиваленте сгорания веса древесины g_0 ($\text{Н}/\text{м}^2$):

$$g_0 = \frac{M}{F} \frac{\sum m_i Q_{hi}^p}{Q_{nd}^p}, \quad (1)$$

где M — вес сгораемой части силовой нагрузки, Н; F — площадь помещения, м^2 ;

m_i — относительная массовая доля i -го материала в составе пожарной нагрузки, доли ед.; Q_{hi}^p — теплота сгорания i -го материала в составе пожарной нагрузки, $\text{Дж}/\text{кг}$;

Q_{nd}^p — теплота сгорания древесины, $\text{Дж}/\text{кг}$.

Тогда часть силовой нагрузки q_{top} , которая слагает пожарную нагрузку и выгорает в процессе пожара, будет определяться выражением

$$q_{top} = \frac{M}{F} = g_0 \frac{Q_{nd}^p}{\sum m_i Q_{hi}^p}, \quad (2)$$

где q_{top} — сгораемая и трудносгораемая часть силовой нагрузки, $\text{Н}/\text{м}^2$.

Низшая рабочая теплота сгорания помещения $Q_{n,pom}^p$ ($\text{Дж}/\text{кг}$) определяется долями масс материалов, а также рабочей теплотой сгорания каждого из них:

$$Q_{n,pom}^p = \sum m_i Q_{hi}^p. \quad (3)$$

Учитывая (2) и (3), получим:

$$q_{top} = g_0 (Q_{nd}^p / Q_{n,pom}^p). \quad (4)$$

Величина выгоревшей удельной приведенной пожарной нагрузки Δg_0 ($\text{Н}/\text{м}^2$) в любой момент времени t зависит от скорости сгорания древесины $\vartheta_{cgor,d}$ ($\text{Н}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) и определяется по формуле

$$\Delta g_0 = \vartheta_{cgor,d} t, \quad (5)$$

где t — время с момента начала пожара, с.

Учитывая формулы (4) и (5), получим выражение для сгоревшей части силовой нагрузки Δq_{top} ($\text{Н}/\text{м}^2$), слагающей пожарную нагрузку, в любой момент времени t :

$$\Delta q_{top} = \vartheta_{cgor,d} t \frac{Q_{nd}^p}{Q_{n,pom}^p}. \quad (6)$$

Поскольку режим пожара стандартный, температура пожара описывается следующей зависимо-

стью от времени t (на основании ГОСТ 30247.0–94 “Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования”):

$$T = 345 \cdot \lg \left(\frac{8t}{60} + 1 \right) + T_0, \quad (7)$$

где T — температура пожара в момент времени t , $^\circ\text{C}$;

T_0 — температура среды в помещении до начала пожара, $^\circ\text{C}$.

Тогда время пожара как функция от температуры

$$t = 7,5 (10^{0,0029(T-T_0)} - 1). \quad (8)$$

Учитывая уравнения (6) и (8), получим:

$$\Delta q_{top} = 7,5 (10^{0,0029(T-T_0)} - 1) \vartheta_{cgor,d} \frac{Q_{nd}^p}{Q_{n,pom}^p}. \quad (9)$$

Выполним проверку полученной формулы по размерностям:

$$\left[c \cdot \frac{H}{m^2 \cdot c} \cdot \frac{Дж}{kg} \cdot \frac{kg}{Дж} \right] = \left[\frac{H}{m^2} \right], \quad (10)$$

что соответствует размерности нагрузки.

Так как скорость сгорания древесины $\vartheta_{cgor,d}$ и низшая рабочая теплота сгорания древесины Q_{nd}^p известны (в рамках граничных условий нашей задачи их можно принять за константы [19, 20]), получим:

$$\Delta q_{top} = 1,42 \cdot 10^7 \frac{10^{0,0029(T-T_0)} - 1}{Q_{n,pom}^p}. \quad (11)$$

Результаты и их обсуждение

На основании формулы (11) выполним расчет изменения нагрузки при пожаре в административном здании. Низшая рабочая теплота сгорания $Q_{n,adm,zd}^p = 14,0 \text{ МДж}/\text{кг}$ (даннные взяты из [19, 20]). Результаты расчета представим в графическом виде: зависимость изменения силовой нагрузки от температуры пожара — на рис. 1, зависимость изменения силовой нагрузки от времени пожара — на рис. 2.

Таким образом, можно прогнозировать существенное снижение силовой нагрузки уже через 60 мин с момента начала огневого воздействия (не менее чем на $420 \text{ Н}/\text{м}^2$).

Для наглядной иллюстрации выполним расчет статически определимой плиты перекрытия, работающей по балочной схеме (опирание по двум сторонам). Разрушение плиты перекрытия произойдет в результате прогрева бетона сжатой зоны с последующим снижением его прочности, уменьшением рабочей высоты сечения и разрушением плиты по растигнутой арматуре.

Исходные данные для расчета: высота плиты перекрытия $h = 160 \text{ мм}$, ее ширина $b = 1000 \text{ мм}$, пролет плиты $l = 4000 \text{ мм}$; бетон тяжелый класса В25;

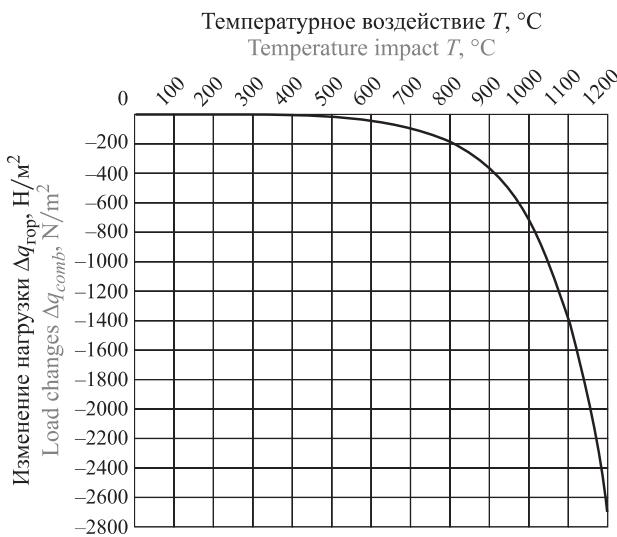


Рис. 1. Зависимость изменения силовой нагрузки от температуры пожара

Fig. 1. The dependence of forced loading changes on temperature of fire

нормативная приизменная прочность бетона $R_{bn} = 18,5 \text{ МПа}$; арматура класса A500, армирование $A_s = 2,51 \text{ см}^2$, нормативное сопротивление арматуры растяжению $R_{sn} = 500 \text{ МПа}$; толщина защитного слоя бетона 15 мм; нормативная постоянная и длительная нагрузка $6400 \text{ Н}/\text{м}^2$; сгораемая часть нагрузки $2400 \text{ Н}/\text{м}^2$.

Соотнесем изменение нагрузки с начальным значением сгораемой части нагрузки для нашей задачи и выразим его в процентах (табл. 1).

Как видно из табл. 1, 100 % сгораемой части нагрузки выгорит не ранее чем через 300 мин с момента огневого воздействия.

Изгибающий момент от действия внешних сил в плите перекрытия M ($\text{Н}\cdot\text{м}$) без учета выгорания нагрузки составляет:

$$M = \frac{q l^2}{8} = \frac{6400 \cdot 4,0^2}{8} = 12800 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (12)$$

Таблица 1. Уменьшение сгораемой части нагрузки

Table 1. Decrease of forced loading (in per cents) from the initial value

Время пожара $t, \text{мин}$ Fire time t, min	Температура пожара $T, ^\circ\text{C}$ Fire temperature $T, ^\circ\text{C}$	Уменьшение нагрузки $\Delta q_{top}, \%$ Decrease of forced loading $\Delta q_{comb}, \%$
30	821	11
45	875	14
60	925	18
90	986	29
120	1029	41
150	1060	48
180	1090	57
240	1133	80
300	1184	100

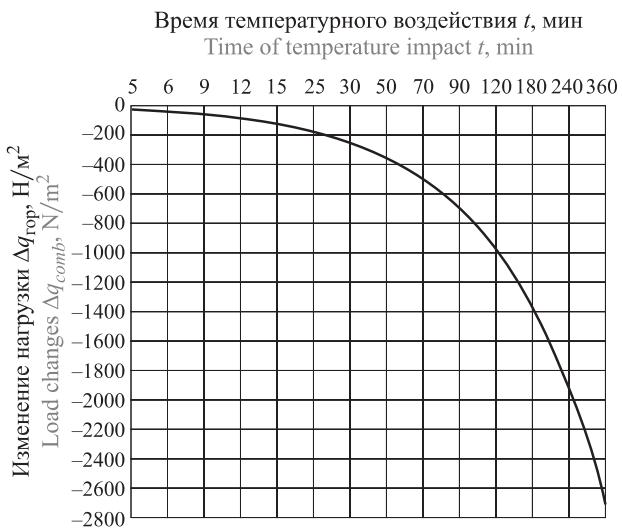


Рис. 2. Зависимость изменения силовой нагрузки от времени пожара

Fig. 2. The dependence of forced loading changes on fire timing

Изгибающий момент от действия внешних сил в плите перекрытия с учетом выгорания нагрузки не является константой и вычисляется по формуле

$$M = \frac{1}{8} \left(q - 1,42 \cdot 10^7 \frac{10^{0,0029(T-T_0)} - 1}{Q_{\text{н.пом}}^{\text{p}}} \right) l^2. \quad (13)$$

Выполним теплотехнический расчет методом конечных элементов с использованием препроцессора — программного комплекса “Salome”, решателя — математического пакета “Elmer FEM solver” и постпроцессора — программного комплекса “Para View”. Результаты расчета прогрева бетона сечения плиты приведены на рис. 3.

По результатам расчета получены изотермы прогрева сжатой зоны бетона сечения во времени (рис. 4).

Расчет прочности железобетонного сечения изгибаемой плиты выполним по методу “Изотермы 500 °C”. Бетон, прогретый до 500 °C, выключаем

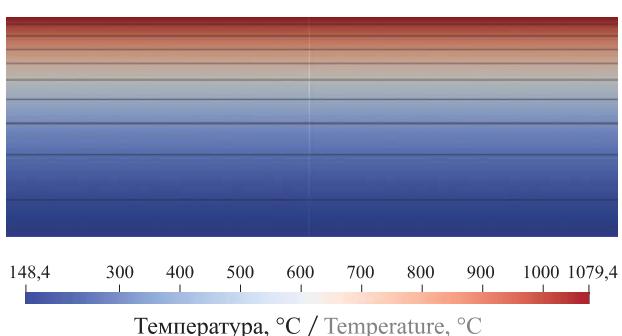


Рис. 3. Изотермы в сечении плиты при одностороннем обогреве верхней части сечения через 180 мин воздействия стандартного температурного режима пожара

Fig. 3. Isotherms in the cross section of the stove with one-sided heating along the upper part of the cross section after 180 minutes of the standard temperature of the fire

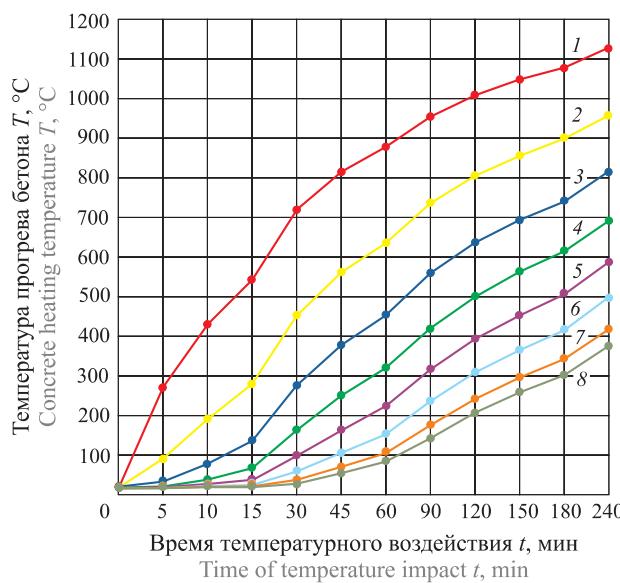


Рис. 4. Изотермы прогрева сжатой зоны бетона сечения плиты на глубине 0 мм (1), 0,015 мм (2), 0,030 мм (3), 0,045 мм (4), 0,060 мм (5), 0,075 мм (6), 0,090 мм (7) и 0,100 мм (8)

Fig. 4. Isotherms of heating the compressed zone of the concrete section of the slab at the depth 0 mm (1), 0.015 mm (2), 0.030 mm (3), 0.045 mm (4), 0.060 mm (5), 0.075 mm (6), 0.090 mm (7) and 0.100 mm (8)

из работы сечения. Результаты расчета приведены в табл. 2 и на рис. 5.

Из графиков на рис. 5 видно, что резерв несущей способности \$R\$ (закрашенная красным цветом область) составляет не менее 79 мин.

Используя метод наименьших квадратов, получим аналитическое решение для прочности сечения рассматриваемой плиты в зависимости от времени:

$$M_1 = R_b b x [(0,1 \cdot 10^{-9} t^2 - 0,6 \cdot 10^{-5} t + 0,145) - 0,5x]. \quad (14)$$

Выполним оценку вклада в изменение напряженно-деформированного состояния сечения плиты функции уменьшения нагрузки и функции снижения несущей способности. Для этого определим скорость изменения данных функций в зависимости от времени, т. е. вычислим производные функций:

$$\frac{dM_1}{dt} = 0,22 \cdot 10^{-4} t - 0,645 \text{ (Н\cdotм/с)}; \quad (15)$$

$$\frac{dM_2}{dt} = -0,27 \text{ (Н\cdotм/с)}. \quad (16)$$

Построим графики полученных функций (рис. 6).

Таким образом, из графиков рис. 6 видно, что каждую минуту нагрузка убывает на величину от 0,13 % от начального значения (в начале высокотемпературного воздействия) до 0,19 % от начального значения (через 240 мин с момента начала высокотемпературного воздействия), а несущая способность

Таблица 2. Значения изгибающего момента с учетом выгорания нагрузки при высоте сжатой зоны бетона \$x = 5,81\$ мм

Table 2. Values of bending moment considering forced loading destroyed by fire at the height of compressed concrete zone \$x = 5.81\$ mm

Время \$t\$, мин / Time \$t\$, min	Глубина прогрева до критической температуры \$a_r\$, мм Depth of warming up to critical temperature \$a_r\$, mm	Рабочая высота сечения при нагреве \$h_{0r}\$, мм Working height section during heating \$h_{0r}\$, mm	Изгибающий момент, Н\$\cdot\$м Bending moment, N\$\cdot\$m	
			воспринимаемое сечением \$M_1\$ Taken by section \$M_1\$	от действия нагрузки \$M_2\$ Under acting load \$M_2\$
0	0	145	71,5	15275
30	10	135	66,5	14200
45	15	130	64,1	13663
60	20	125	61,6	13125
69	23	122	60,2	12800
90	30	115	56,7	12050
120	35	110	54,2	11513
148	44	101	49,8	10501
150	45	100	49,3	10438
180	50	95	46,8	9900
240	65	80	39,4	8288
				8963

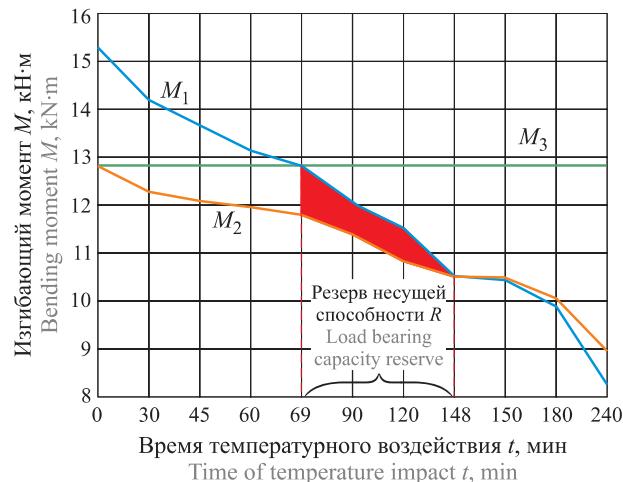


Рис. 5. Зависимость изгибающих моментов, воспринимаемого сечением \$M_1\$; возникающего с учетом уменьшения нагрузки \$M_2\$; возникающего от постоянной нагрузки \$M_3\$, от времени

Fig. 5. The dependence of bending moments on time, perceived by the cross-section \$M_1\$; arising taking into account the reduction of the load \$M_2\$; arising from the constant load \$M_3\$

понижается более равномерно — на 0,25–0,26 % от начального значения в течение всего времени воздействия.

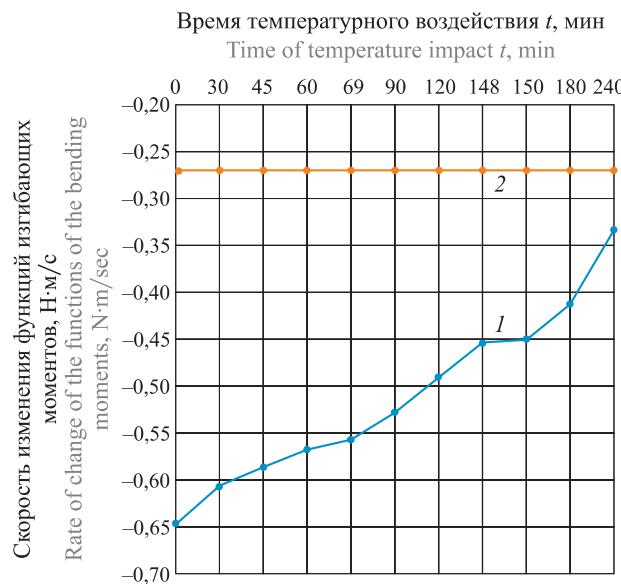


Рис. 6. Скорости изменения функций изгибающих моментов во времени: 1 — несущей способности сечения плиты; 2 — нагрузки

Fig. 6. The rate of change of the functions of bending moments in time: 1 — the bearing capacity of the slice of the plate from time to time; 2 — load

Заключение

Современная нормативная база не учитывает возможностей высокотемпературного воздействия на верхнюю грань железобетонных плит перекрытий и покрытий. В условиях пожара происходит нагрев верхней части плит перекрытий и покрытий, вследствие чего в конструкциях возникают непроектные схемы разрушения.

В настоящей работе авторы рассмотрели возможность учета изменения силовой нагрузки в связи с ее выгоранием в ходе пожара. В статье предложены аналитические зависимости, позволяющие учитывать фактическую силовую нагрузку, изменяющуюся в ходе пожара, при расчетах плит покрытий и перекрытий на огнестойкость. Проведено расчетное исследование и обоснованы резервы несущей способности изгибаемых элементов, которые не учитываются на данный момент.

Применение предложенной методики позволит наиболее достоверно оценивать и прогнозировать резервы несущей способности железобетонных плит перекрытий и покрытий при высокотемпературном воздействии в условиях пожара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dehn F., Werther N., Knitl J. Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig // Beton- und Stahlbetonbau. — 2006. — Vol. 101, Issue 8. — P. 631–636 (in German). DOI: 10.1002/best.200608186.
2. Kordina K. Brände in unterirdischen verkehrsanlagen // Bautechnik. — 2003. — Vol. 80, No. 5. — P. 327–338 (in German). DOI: 10.1002/bate.200302620.
3. Korolchenko D., Tusnin A., Trushina S., Korolchenko A. Physical parameters of high expansion foam used for fire suppression in high-rise buildings // International Journal of Applied Engineering Research. — 2015. — Vol. 10, No. 21. — P. 42541–42548.
4. Law M. A review of formulae for T-equivalent // Fire Safety Science. — 1997. — Vol. 5. — P. 985–996. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-985.
5. Lees' loss prevention in the process industries. Hazard identification, assessment and control / Mannan S. (ed.). — 3rd ed. — Texas, USA : Elsevier, Inc., 2005. — Vol. 1. — 3708 p. DOI: 10.1016/b978-0-7506-7555-0.x5081-6.
6. Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions // Fire Safety Journal. — 2018. — Vol. 95. — P. 42–50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004.
7. Werther N. Brandversuche an tunnelinnenschalenbetonen für den M 30-nordtunnel in Madrid // Beton- und Stahlbetonbau. — 2006. — Vol. 101, Issue 9. — P. 729–731. (in German). DOI: 10.1002/best.200608187.
8. Жуков В. В., Молчадский И. С., Лавров В. Н. Расчет пределов огнестойкости безбалочных перекрытий // Пожарная безопасность. — 2006. — № 1. — С. 36–41.
9. Мехрализадех А. Конструктивная безопасность монолитных высотных зданий с переходными этажами при аварийных воздействиях : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2014. — 202 с.
10. Tamrazyan A. G. Calculation of reinforced concrete plates with hole at long-term loading // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2018. — Vol. 365. — Article Number 052021. DOI: 10.1088/1757-899x/365/5/052021.
11. Голованов В. И., Павлов В. В., Пехотиков А. В. Экспериментальные и аналитические исследования огнестойкости сплошной бетонной плиты со стальной и композитной арматурой // Пожарная безопасность. — 2013. — № 2. — С. 44–51.
12. Мкртычев О. В., Сидоров Д. С. Современные подходы к определению предела огнестойкости зданий и сооружений // Вестник НИЦ “Строительство”. — 2011. — № 3–4. — С. 96–111.

13. 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.
14. Тамразян А. Г., Звонов Ю. Н. К оценке надежности изгибаемых железобетонных плит при огневых воздействиях // Научное обозрение. — 2015. — № 14. — С. 130–133.
15. Кузнецова И. С., Соломонов В. В. Важные аспекты пожарной безопасности зданий и сооружений // Бетон и железобетон — взгляд в будущее : III Всероссийская (II Международная) конференция. — В 7 т. — М. : МГСУ, 2014. — Т. 2. — С. 81–86.
16. Федоров В. С., Левитский В. Е., Молчадский И. С., Александров А. В. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций. — М. : АСВ, 2009. — 408 с.
17. Ройтман В. М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. — М. : Пожнаука, 2001. — 382 с.
18. Молчадский И. С. Пожар в помещении. — М. : ВНИИПО, 2005. — 456 с.
19. Абдурагимов И. М., Андрюсов А. С., Исаева Л. К., Крылов Е. В. Процессы горения. — М. : Высшая инженерная пожарно-техническая школа МВД СССР, 1984. — 268 с.
20. Драйздейл Д. Д. Введение в динамику пожаров / Пер. с англ. — М. : Стройиздат, 1990. — 424 с.

REFERENCES

1. F. Dehn, N. Werther, J. Knitl. Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig. *Beton- und Stahlbetonbau*, 2006, vol. 101, issue 8, pp. 631–636 (in German). DOI: 10.1002/best.200608186.
2. K. Kordina. Brände in unterirdischen verkehrsanlagen. *Bautechnik*, 2003, vol. 80, no. 5, pp. 327–338 (in German). DOI: 10.1002/bate.200302620.
3. D. Korolchenko, A. Tusnin, S. Trushina, A. Korolchenko. Physical parameters of high expansion foam used for fire suppression in high-rise buildings. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 21, pp. 42541–42548.
4. M. Law. A review of formulae for T-equivalent. *Fire Safety Science*, 1997, vol. 5, pp. 985–996. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-985.
5. Mannan S. (ed.). *Lees' loss prevention in the process industries. Hazard identification, assessment and control*. 3rd ed. Texas, USA, Elsevier, Inc., 2005, vol. 1. 3708 p. DOI: 10.1016/b978-0-7506-7555-0.x5081-6.
6. A. Lucherini, L. Giuliani, G. Jomaas. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions. *Fire Safety Journal*, 2018, vol. 95, pp. 42–50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004.
7. N. Werther. Brandversuche an tunnelinnenschalenbetonen für den M 30-nordtunnel in Madrid. *Beton- und Stahlbetonbau*, 2006, vol. 101, issue 9, pp. 729–731 (in German). DOI: 10.1002/best.200608187.
8. V. V. Zhukov, I. S. Molchadsky, V. N. Lavrov. Calculation of fire resistance limits of girderless floors. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2006, no. 1, pp. 36–41 (in Russian).
9. A. Mehralizadeh. *Constructive safety of in-situ high-rised buildings with connected floors in case of emergency*. Cand. tech. sci. diss. Moscow, 2014. 202 p. (in Russian).
10. A. G. Tamrazyan. Calculation of reinforced concrete plates with hole at long-term loading. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 365, article number 052021. DOI: 10.1088/1757-899x/365/5/052021.
11. V. I. Golovanov, V. V. Pavlov, A. V. Pekhotikov. Experimental and analytical researches into fire resistance of continuous concrete slab with steel and composite reinforcement. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2013, no. 2, pp. 44–51 (in Russian).
12. O. V. Mkrtchyan, D. S. Sidorov. Modern approaches for determination of degree of fire resistance of buildings and facilities. *Vestnik NITs "Stroitelstvo" / Bulletin of Science and Research Center "Stroitelstvo"*, 2011, no. 3–4, pp. 96–111 (in Russian).
13. A. G. Tamrazyan, Yu. N. Zvonov. To assessing the reliability reinforced concrete flat slabs for punching under the action of concentrated force at high temperatures. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo / Industrial and Civil Engineering*, 2016, no. 7, pp. 24–28 (in Russian).
14. A. G. Tamrazyan, Yu. N. Zvonov. On assessing the reliability of bendable ferroconcrete plates under fire impact. *Nauchnoye obozreniye / Science Review*, 2015, no. 14, pp. 130–133 (in Russian).
15. I. S. Kyznetsova, V. V. Solomonov. Important aspects of building and construction fire safety. In: *Beton i zhelezobeton — vzglyad v budushcheye* [Concrete and reinforced concrete — a look into future]. Proceedings of III Russian (II International) Conference. In 7 vols. Moscow, MGSU Publ., 2014, vol. 2, pp. 81–86.

16. V. S. Fedorov, V. E. Levitskiy, I. S. Molchadskiy, A. V. Aleksandrov. *Ognestoystoykost i pozharnaya opasnost stroitelnykh konstruktsiy* [Fire resistance and fire hazard of constructions]. Moscow, ASV Publ., 2009. 408 p. (in Russian).
17. V. M. Roytman. *Inzhenernyye resheniya po otsenke ognestoystokosti proektiruyemykh i rekonstruyiruemых zdanii* [Engineering solutions for evaluation of fire resistance of designed and reconstructed buildings]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2001. 382 p. (in Russian).
18. I. S. Molchadskiy. *Pozhar v pomeshchenii* [Fire in a premise]. Moscow, VNIIPo Publ., 2005. 456 p. (in Russian).
19. I. M. Abduragimov, A. S. Androsov, L. K. Isaeva, E. V. Krylov. *Protsessy goreniya* [Burning processes]. Moscow, Higher Engineering Fire and Technical School of Ministry of Interior of Russia Publ., 1984. 268 p. (in Russian).
20. D. D. Drayzdel. *An introduction to fire dynamics*. Chichester, John Wiley and Sons, 1985 (Russ. ed.: Drayzdel D. D. Vvedeniye v dinamiku pozharov. Moscow, Stroyizdat, 1990. 424 p.).

Поступила 11.02.2020, после доработки 18.03.2020;

принята к публикации 23.03.2020

Received February 11, 2020; Received in revised form March 18, 2020;

Accepted March 23, 2020

Информация об авторах

ТАМРАЗЯН Ашот Георгиевич, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; Author ID: 55975413900; ORCID: 0000-0003-0569-4788; e-mail: tamrazian@mail.ru

ЗВОНОВ Юрий Николаевич, инженер, ООО “ПИК-Проект”, г. Москва, Российская Федерация; Author ID: 57207458579; ORCID: 0000-0002-2987-7426; e-mail: zvonovyn@mail.ru

Information about the authors

Ashot G. TAMRAZIAN, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Reinforced and Stone Structures Department, National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Author ID: 55975413900; ORCID: 0000-0003-0569-4788; e-mail: tamrazian@mail.ru

Yuriy N. ZVONOV, Engineer, ООО “PIK-Proyekt”, Moscow, Russian Federation; Author ID: 57207458579; ORCID: 0000-0002-2987-7426; e-mail: zvonovyn@mail.ru