



С.А. Соловьев, А.А. Соловьева, Л.С. Шевцов
Вологодский государственный университет

ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК И ПЛИТ ПОСЛЕ ПОЖАРА ПРИ НЕПОЛНОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В исследовании предложен подход к оперативной оценке надежности изгибаемых железобетонных элементов по критерию прочности нормальных сечений после пожара с использованием теории выпуклых множеств. Приведено сравнение различных нормативных моделей и экспериментальных исследований снижения прочности бетона и стали арматуры после высокотемпературных воздействий. Путем численного моделирования методом Монте-Карло установлено, что предложенный подход дает более осторожную оценку надежности вследствие отсутствия информации о законах распределения случайных величин. Метод оценки надежности может быть использован для первичной оценки безопасности ликвидаций последствий пожара и проведения работ по выявлению категории технического состояния здания или сооружения.

Безопасность, надежность, пожар, теория выпуклых множеств, вероятность отказа, неопределенность, железобетонная балка.

В 2010 г. вступил в силу Федеральный закон № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», в соответствии с которым механическая безопасность зданий и сооружений должна быть обеспечена на всех стадиях жизненного цикла здания или сооружения. Одной из мер механической безопасности зданий и сооружений может служить надежность их несущих элементов. В соответствии с ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований», надежность – это свойство строительного объекта выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации. В качестве показателя надежности элементов строительных конструкций зачастую применяется вероятность безотказной работы или вероятность отказа.

В работе [1] отмечается, что в РФ и за рубежом ежегодно происходит огромное количество пожаров в зданиях и сооружениях, что существенно влияет на снижение качества физико-механических свойств несущих конструкций зданий и сооружений. В соответствии с Межгосударственным стандартом ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» после пожара необходимо проведение обследования технического состояния здания или сооружения «по результатам последствий пожаров, стихийных бедствий, аварий, связанных с разрушением здания (сооружения)». Одной из проблем в данной сфере может являться оперативная оценка безопасности пребывания специалистов по ликвидации последствий пожара или специалистов по обследованию технического состояния в здании после пожара. В данной работе предлагается исследовать вопрос оценки надежности изгибаемых железобетонных элементов (балок и плит) по критерию прочности в условиях недостатка статистических данных

для использования известных вероятностно-статистических подходов анализа надежности.

В соответствии с СП 468.1325800.2019 «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности», огнесохранность строительной конструкции – это способность строительной конструкции сохранять после пожара несущие и (или) ограждающие функции. Огнесохранность характеризует состояние ремонтпригодности конструкции без ее усиления после пожара. В исследовании профессора А.Г. Тамразяна [2] отмечено, что «несмотря на то, что проблема воздействия повышенных и высоких температур исследуется достаточно давно, до сих пор нет четкой методики расчета остаточной несущей способности железобетонных конструкций после пожара». В [3] также отмечается, что исследование подходов к оценке надежности строительных конструкций при огневом воздействии также требует дальнейшего развития.

Прочностные характеристики бетона и арматурной стали в железобетонных элементах снижаются после высокотемпературных воздействий [1]. Прочность бетона после остывания, как правило, ниже прочности бетона при огневом воздействии [4]. Это связано с тепловой инерцией бетона, когда внутренние слои железобетонной конструкции подвергаются воздействию повышенной температуры дольше, чем поверхностные; а также быстрым охлаждением железобетонных конструкций при тушении пожара, что приводит к дополнительным напряжениям в сечении [4].

Существуют различные подходы к моделированию снижения прочности бетона после пожара. На рисунке 1 приведены графики коэффициента остаточной прочности бетона Y после огневого воздействия (остывшего), которые используются для расчета огнесохранности железобетонных конструкций.

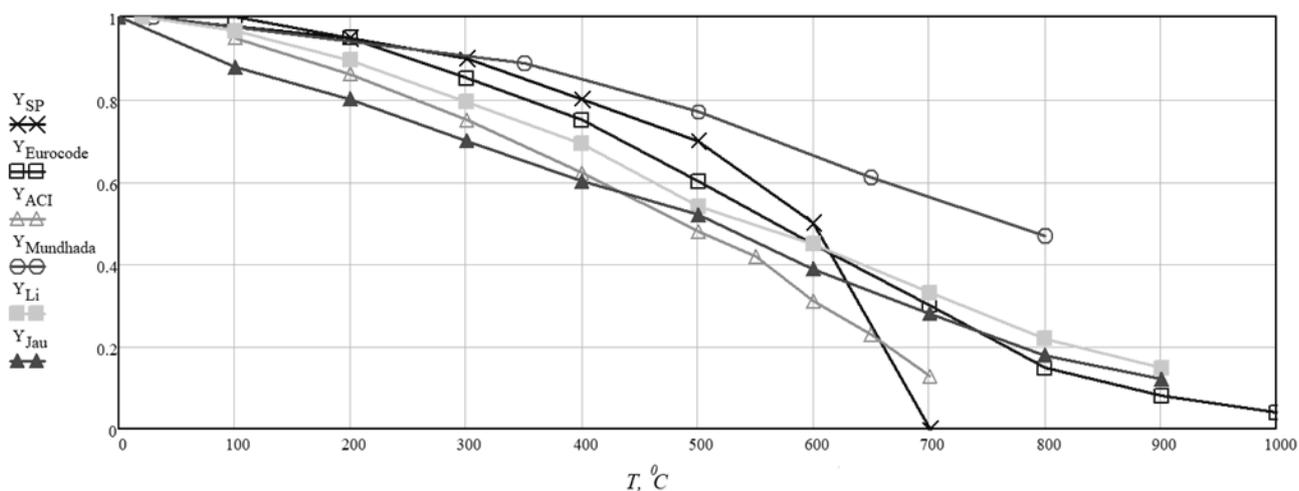


Рис. 1. Изменение коэффициента остаточной прочности остывшего бетона после огневого воздействия: Y_{SP} – по СП 468.1325800.2019, $Y_{Eurocode}$ – по Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1–2, Y_{ACI} – в соответствии с ACI 216.1-07 Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies, $Y_{Mundhada}$ – по экспериментальным исследованиям [5], Y_{Li} – по экспериментальным исследованиям [6], Y_{Jau} – по экспериментальным исследованиям [7]

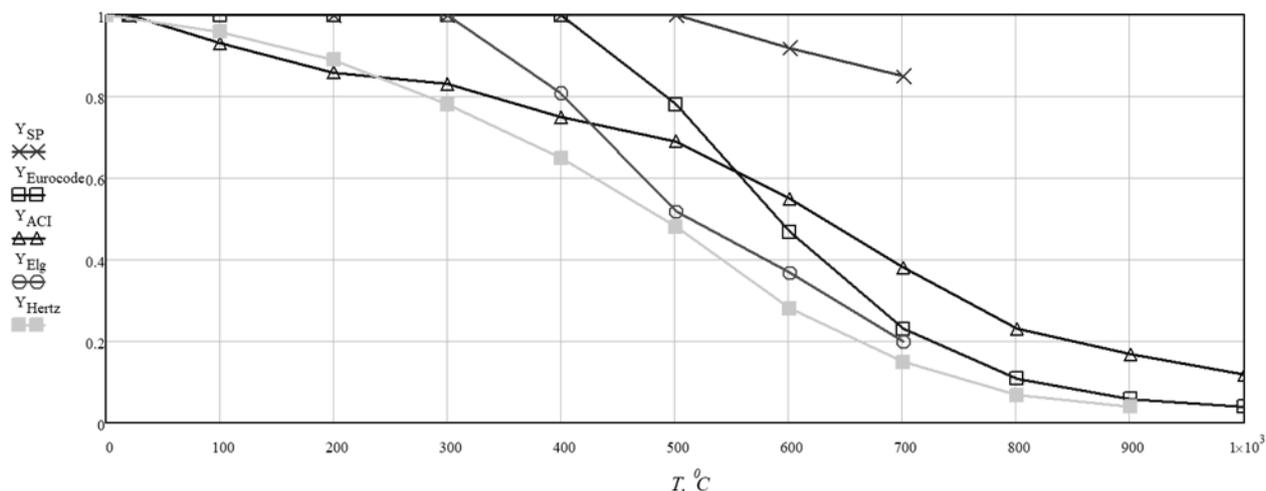


Рис. 2. Изменение коэффициента остаточной прочности стали арматуры после огневого воздействия: Y_{SP} – по СП 468.1325800.2019, $Y_{Eurocode}$ – по Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1–2, Y_{ACI} – в соответствии с ACI 216.1-07 Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies, Y_{Elg} – по экспериментальным исследованиям [8], Y_{Hertz} – по экспериментальным исследованиям [9]

Модели снижения прочности арматурной стали существенно различаются в зависимости от типа и вида арматуры, а также критерия предельного состояния – по пределу текучести или пределу прочности. На рисунке 2 представлены графики снижения прочности стали горячекатанной арматуры по пределу текучести.

Для оперативной оценки прочности бетона могут быть использованы неразрушающие методы контроля. Однако к ним (например, широко используемым методам ударного импульса или ультразвуковым методам) следует относиться очень осторожно при оценке изменения прочности бетона после пожара. Корреляционные зависимости между измеряемой величиной и последующей оценкой прочности бетона могут значительно отличаться для бетонов в нетиповых условиях эксплуатации и после особых воздействий. Наиболее точную оценку прочности бетона и арматурной

стали можно получить по контрольным образцам, вырезанным из исследуемой на надежность железобетонной конструкции. Однако данные мероприятия требуют определенных временных и финансовых затрат, а также ослабляют поперечные сечения конструкции.

В связи с этим предлагается рассмотреть аналитический подход к оперативной оценке надежности железобетонных балок и плит после пожара, на основе результатов которого может быть принято решение о дальнейшей безопасности производства работ по ликвидации последствий пожара и уточнению категории технического состояния здания.

Математическую модель предельного состояния по критерию прочности нормальных сечений изгибаемого железобетонного элемента можно записать в виде:

$$M \leq M_{ult} = R_s A_s (h_0 - 0,5x), \quad (1)$$

где M – изгибающий момент в сечении балки; R_s – расчетное сопротивление арматуры растяжению; A_s – площадь растянутой арматуры; h_0 – рабочая высота сечения железобетонной балки; x – высота сжатой зоны бетона балки, определяемая как $x = \frac{R_s A_s}{R_b b}$, R_b – расчетное сопротивление бетона

сжатию; b – ширина сечения балки.

Работу арматуры в сжатой зоне бетона в (1) не будем учитывать в запас надежности железобетонной балки при оперативной оценке.

После преобразований математическая модель предельного состояния (1) может быть представлена в виде функции

$$(2R_b b)^{-1} \leq \frac{h_0}{R_s A_s} - \frac{M}{(R_s^2 A_s^2)},$$

или

$$\frac{1}{2b} \left[\frac{h_0}{R_s A_s} - \frac{M}{(R_s^2 A_s^2)} \right]^{-1} \leq R_b. \quad (2)$$

Выражение (2) представляет собой функцию $R_b(R_s)$, которую удобно использовать при построении граничной функции предельного состояния.

Степень снижения расчетных сопротивлений бетона и арматуры зависит от температуры прогрева сечений изгибаемых железобетонных элементов. Температура нагрева бетона и арматуры в условиях оперативного анализа может быть оценена экспертом по визуальным признакам (СП 329.1325800.2017 «Здания и сооружения. Правила обследования после пожара») [10, 11] и первичным испытаниям [12].

С учетом комплексной оценки различных факторов экспертная оценка температуры прогрева железобетонного элемента может быть представлена в виде интервала значений $[\underline{t}_b; \bar{t}_b]$, где \underline{t}_b и \bar{t}_b – нижняя и верхняя границы температуры нагрева бетона железобетонного элемента. Следовательно, расчетное сопротивление бетона при сжатии также будет представлено в виде интервала значений $[\underline{R}_b; \bar{R}_b]$. В терминах теории надежности расчетное сопротивление бетона является случайной величиной $\tilde{R}_b(\tilde{t}_b)$ (рис. 1), зависящей от другой случайной величины – температуры прогрева \tilde{t}_b . Аналогичные выкладки могут быть использованы для расчетного сопротивления стали арматуры растяжению $\tilde{R}_s(\tilde{t}_s)$. Математическая модель предельного состояния (2) может быть записана в виде:

$$\frac{1}{2b} \left[\frac{h_0}{\tilde{R}_s(\tilde{t}_s) A_s} - \frac{M}{(\tilde{R}_s(\tilde{t}_s)^2 A_s^2)} \right]^{-1} \leq \tilde{R}_b(\tilde{t}_b). \quad (3)$$

Случайная величина в вероятностно-статистических подходах должна характеризоваться функцией распределения вероятностей с известными параметрами (или их оценками) в соответствии с ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований». Т.к. в рамках оперативной оценки имеется лишь интервал значений расчетных сопротивлений бетона и арматуры, то для анализа надежности воспользуемся специальным подходом, основанным на теории выпуклых множеств (convex sets [13]).

Для оценки надежности на основе теории выпуклых множеств с двумя случайными величинами используется следующий алгоритм. Оси абсцисс и ординат содержат значения случайных величин (рис. 3) – в данной задаче это расчетное сопротивление бетона и расчетное сопротивление стали арматуры. На графике отмечается область в виде прямоугольника (в случае некоррелированных случайных величин), границы которого сформированы интервальными оценками случайных величин. Площадь прямоугольника обозначается как A_{total} . Затем на графике строится функция предельного состояния g , которая в данной задаче будет иметь вид (2). $g = R_b(R_s)$

$= \frac{1}{2b} \left[\frac{h_0}{R_s A_s} - \frac{M}{(R_s^2 A_s^2)} \right]^{-1}$. Площадь, отсекаемая функцией, обозначается площадью отказа $A_{failure}$.

Оценка надежности (условной вероятности безотказной работы) представляет собой выражение:

$$P = 1 - \frac{A_{failure}}{A_{total}}, \quad (4)$$

где $\frac{A_{failure}}{A_{total}}$ интерпретируется как условная вероятность отказа.

Пусть необходимо дать оперативную оценку надежности железобетонной балки перекрытия без предварительного напряжения арматуры. Рабочая высота поперечного сечения балки $h_0 = 0,5$ м, ширина поперечного сечения балки $b = 0,2$ м. Балка армирована 4 стержнями $\phi 14$ мм, класс арматуры А400 ($R_s = 350$ МПа по СП 63.13330.2018). По проектной документации класс бетона балки В25 ($R_b = 14,5$ МПа по СП 63.13330.2018). Расчетный изгибающий момент в анализируемом сечении балки – $M = 86$ кН·м.

Для оценки снижения расчетного сопротивления бетона и стали арматуры после пожара используем модели СП 468.1325800.2019 (рис. 1, 2). Пусть экспертом установлены следующие температуры нагрева при пожаре: $[\underline{t}_b; \bar{t}_b] = [400; 550]$ °С и $[\underline{t}_s; \bar{t}_s] = [500; 650]$ °С. Тогда по моделям СП можно записать интервалы расчетных сопротивлений: $[\underline{R}_b; \bar{R}_b] = [8,7; 11,6]$ МПа, $[\underline{R}_s; \bar{R}_s] = [309,8; 350]$ МПа (рис. 3).

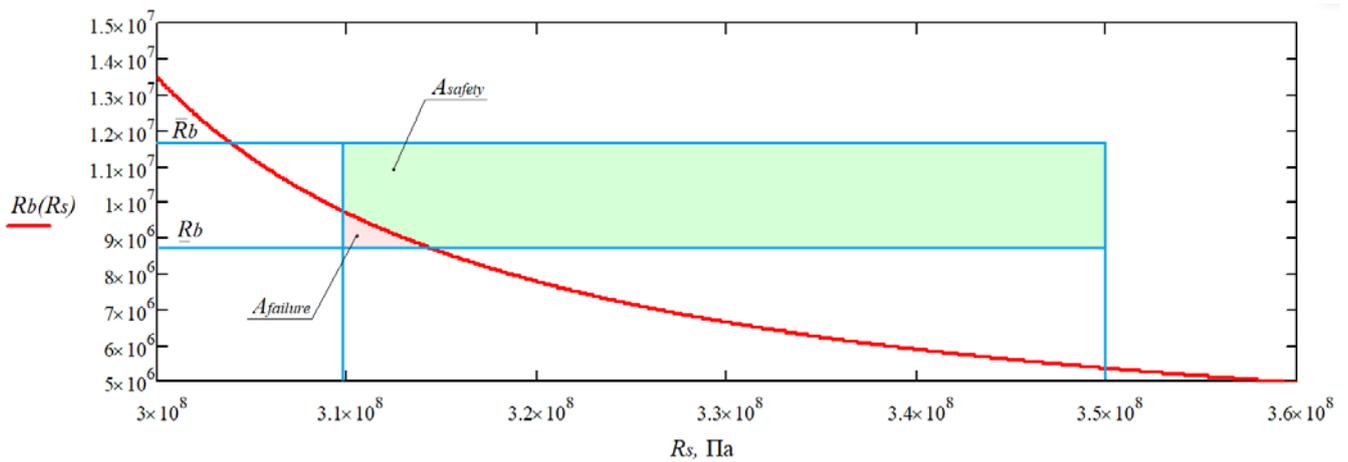


Рис. 3. Графическое представление решения задачи по оценке надежности по данным примера

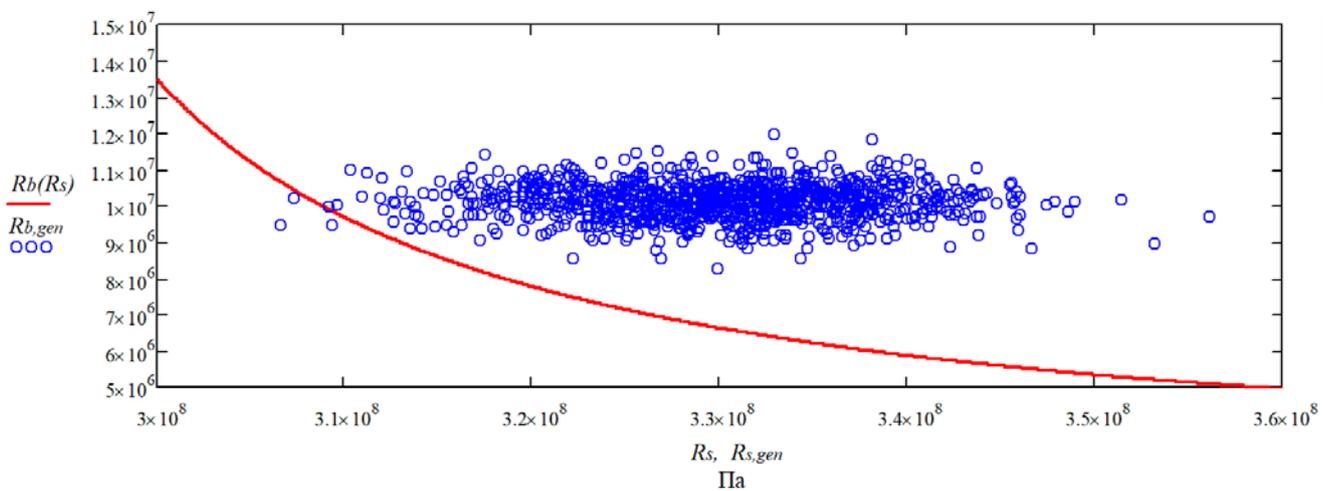


Рис. 4. Результат генерации 1000 значений комбинаций прочности бетона и арматуры железобетонной балки

Вычислим характерные точки:

$$R_b(\underline{R}_s) = R_b(309,8) = 9,74 \text{ МПа},$$

$$R_b(X) = \underline{R}_b \rightarrow X = 314,45 \text{ МПа}.$$

С учетом линеаризации функции $R_b(R_s)$ на рассматриваемом участке (в запас надежности) получим:

$$A_{failure} = 0,5 \cdot [R_b(\underline{R}_s) - \underline{R}_b] \cdot [X - \underline{R}_s] = \\ = 0,5 \cdot [9,74 - 8,7] \cdot [314,45 - 309,8] = 2,41 \text{ МПа}^2.$$

$$A_{total} = [\bar{R}_b - \underline{R}_b] \cdot [\bar{R}_s - \underline{R}_s] = \\ = [11,6 - 8,7] \cdot [350 - 309,8] = 11,5 \text{ МПа}^2.$$

$$\text{По (4) надежность составит: } P = 1 - \frac{A_{failure}}{A_{total}} = 1 - \frac{2,418}{116,5} = \\ = 0,979.$$

Для объективной верификации рассмотренного подхода проведем численный эксперимент с генерацией случайных чисел по методу Монте-Карло. Сгенерируем в программе PTC MathCAD 1000 пар значений \tilde{R}_b и \tilde{R}_s . Каждая пара значений будет

характеризовать фактическую прочность бетона и стали арматуры балки для конкретной балки. Для генерации случайных величин будем использовать нормальный закон распределения со статистическими параметрами $m_{R_b} = 10,15$ МПа, $S_{R_b} = 0,5$ МПа, $m_{R_s} = 330$ МПа, $S_{R_s} = 7,0$ МПа, которые подобраны для интервалов $[\underline{R}_b; \bar{R}_b] = [8,7; 11,6]$ МПа, $[\underline{R}_s; \bar{R}_s] = [309,8; 350]$ МПа с учетом правила трех сигм. На рисунке 4 представлены результаты генерации 1000 вариантов случайных комбинаций расчетных сопротивлений бетона \tilde{R}_b и арматуры \tilde{R}_s в рассматриваемой балке.

По результатам генерации 1000 пар значений \tilde{R}_b и \tilde{R}_s лишь в 3 случаях из 1000 зафиксировано превышение предельного состояния по модели (3). Вероятность безотказной работы можно представить в виде $(1000-3)/1000=0,997$.

Оценка надежности путем использования метода Монте-Карло получилась выше, т.к. принимался известный закон распределения случайной величины. Оценка надежности по предложенному подходу с ис-

пользованием теории выпуклых множеств позволяет получить более осторожную оценку при неполной статистической информации о контролируемых параметрах.

Таким образом, предложенный подход позволяет получить оперативную оценку надежности по результатам экспертной оценки температуры нагрева бетона и арматуры изгибаемого железобетонного элемента по внешним признакам. Соответствующая оценка надежности может служить одной из составляющей для расчета риска [14, 15].

Выводы:

1. По результатам анализа различных моделей снижения прочности бетона и арматуры в железобетонных элементах для оценки их остаточной несущей способности можно отметить, что резкое снижение прочностных характеристик арматуры происходит после ее нагрева до 400–500 °С; снижение прочности бетона более равномерно, но в то же время нагрев бетона до 200 °С может привести к снижению прочности до 20 %.

2. Предложен подход к оценке надежности изгибаемых железобетонных элементов (балок и плит) после высокотемпературных воздействий с использованием теории выпуклых множеств (convex sets). Такой подход позволяет получить оперативную оценку надежности на основе экспертной оценки температуры прогрева бетона и арматуры в железобетонных элементах.

3. Рассмотренный подход верифицирован путем проведения численного моделирования статистических показателей прочности бетона и арматуры методом Монте-Карло. При отсутствии данных о виде распределений и их статистических параметрах оценка надежности получается несколько заниженной, что является более осторожным результатом в условиях статистической неопределенности, чем необоснованное принятие вероятностно-статистических гипотез.

Литература

1. Шуровкина, Л. Л. Огнестойкость железобетонных конструкций: основные принципы расчета по нормам РФ и ЕС / Л. Л. Шуровкина // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 6 (45). – С. 89–101.

2. Тарасенко, А. В. Прочность и деформативность железобетонных конструкций, поврежденных пожаром / А. В. Тарасенко, А. Г. Тамразян // Новое слово

в науке: перспективы развития. – 2016. – № 1–2 (7). – С. 74–77.

3. Guo, Q. Probabilistic evaluation of structural fire resistance / Q. Guo, K. Shi, Z. Jia, A. E. Jeffers // Fire technology. – 2013. – Vol. 49 (3). – pp. 793–811.

4. Wroblewska, J. Assessing concrete strength in fire-damaged structures / J. Wroblewska, R. Kowalski // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 254. – pp. 119–122.

5. Mundhada, A. R. Effect of high temperature on compressive strength of concrete / A. R. Mundhada, A. D. Pofale // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. – 2015. – Vol. 12(1). – pp. 66–70.

6. Li, Y. H. Test results and model for the residual compressive strength of concrete after a fire / Y. H. Li, J. M. Franssen // Journal of Structural Fire Engineering. – 2011. – Vol. 2. – No. 1. – pp. 29–44.

7. Jau, W. C. A study of reinforced concrete corner columns after fire / W. C. Jau, K. L. Huang // Cement and concrete Composites. – 2008. – Vol. 30, No. 7. – pp. 622–638.

8. Elghazouli, A. Y. Experimental evaluation of the mechanical properties of steel reinforcement at elevated temperature / A. Y. Elghazouli, K. A. Cashell, B. A. Izzuddin // Fire Safety Journal. – 2009. – Vol. 44, No. 6. – pp. 909–919.

9. Hertz, K. D. Reinforcement data for fire safety design / K. D. Hertz // Magazine of Concrete Research. – 2004. – Vol. 56, No. 8. – pp. 453–459.

10. Hager, I. Colour change in heated concrete / I. Hager // Fire Technology. – 2014. – Vol. 50, No. 4. – pp. 945–958.

11. Arioz, O. Effects of elevated temperatures on properties of concrete / O. Arioz // Fire safety journal. – 2007. – Vol. 42, No. 8. – pp. 516–522.

12. Методические рекомендации по оценке свойств бетона после пожара. – Москва : НИИЖБ Госстроя СССР, 1985. – 20 с.

13. Luo, Y. Structural reliability assessment based on probability and convex set mixed model / Y. Luo, Z. Kang, A. Li // Computers & Structures. – 2009. – Vol. 87, No. 21–22. – pp. 1408–1415.

14. Crespo, L. G. Staircase predictor models for reliability and risk analysis / L. G. Crespo, S. P. Kenny, D. P. Giesy // Structural Safety. – 2018. – Vol. 75. – pp. 35–44.

15. Махутов, Н. А. Применение технической диагностики для расчета вероятности разрушения технических устройств и оценки риска аварии / Н. А. Махутов, В. И. Иванов, В. В. Мусатов // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 9. – С. 53–64.

S.A. Solovev, A.A. Soloveva, L.S. Shevcov
Vologda State University

EXPRESS ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS AND SLABS RELIABILITY AFTER FIRE IMPACTS WITH LIMITED STATISTICAL DATA

The article describes an approach to the operational assessment of the reliability for flexural reinforced concrete elements (beams and slabs) by the criterion of the normal sections strength after a fire impacts using the convex sets theory. A comparison of various normative models and experimental studies of the decrease in the strength of concrete and steel reinforcement after high-temperature impacts is presented. By numerical simulation using the Monte Carlo approach, it is established that the proposed approach gives a more conservative assessment of reliability due to the lack of information about the probability distribution functions of the random variables. The reliability analysis method can be used for the primary assessment of the structural safety and for the identification of the category of technical condition of a structure.

Safety, reliability, fire impact, convex set theory, failure probability, uncertainty, reinforced concrete beam.