

Несущая способность сжатых железобетонных элементов при комбинированных особых воздействиях

Тамразян Ашот Георгиевич (Москва). Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН. Кафедра железобетонных и каменных конструкций Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26. НИУ МГСУ). Эл. почта: tamrazian@mail.ru

Аннотация. Существует ряд факторов окружающей среды, которые с течением времени снижают сопротивляемость конструкции и, как следствие, её физико-механические характеристики, вызывая увеличение риска повреждения или разрушения. Для железобетонных конструкций при длительной эксплуатации это выражается в коррозионных повреждениях, непосредственно влияющих на работу несущих элементов. Вызывает научный интерес воздействие температуры на коррозионно-повреждённые несущие железобетонные конструкции, в результате которого изменяется их прочность, устойчивость, огнестойкость, что важно для определения уязвимости и оценки живучести и защищённости зданий и сооружений. К настоящему времени практически отсутствуют подходы, комплексно учитывающие действительную работу железобетонных конструкций с учётом ухудшения их динамического сопротивления под воздействием описанных выше факторов, которые могут привести к значительным разрушениям и социально-экономическим потерям. Таким образом, актуальность решения поставленной задачи заключается в определении прочностных и деформативных характеристик несущих железобетонных конструкций при КОВ, что позволит существенно повысить уровень безопасности и защищённости основных фондов страны в целом при правильной оценке технического состояния. В статье представлена работа сжатых железобетонных элементов при комбинированном действии коррозии и высокой температуры при пожаре.

Ключевые слова: железобетон, колонна, коррозия, температурные воздействия, несущая способность

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект «Оценка технического состояния зданий на основе живучести и риска» № FSWG-2024-0003).

Для цитирования. Тамразян А.Г. Несущая способность сжатых железобетонных элементов при комбинированных особых воздействиях // Academia. Архитектура и строительство. – 2025. – № 3. – С. 146–152. – DOI: 10.22337/2077-9038-2025-3-146-152.

Bearing Capacity of Compressed Reinforced Concrete Elements under Combined Special Effects

Tamrazyan Ashot G. (Moscow). Doctor of Sciences in Engineering, Professor, Corresponding Member of RAACS. The Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures of the National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, Russia, 129337. NRU MGSU). E-mail: tamrazian@mail.ru

Abstract. There are a number of environmental factors that over time reduce the resistance of the structure and, as a consequence, its physical and mechanical characteristics, causing an increase in the risk of damage or failure. For reinforced concrete structures in long-term operation, this manifests itself in corrosion damage, directly affecting the performance of load-bearing elements. Of scientific interest is the effect of temperature on corrosion-damaged load-bearing reinforced concrete structures, resulting in changes in their strength, stability, fire resistance, which is important for determining the vulnerability and assessing the

survivability and protection of buildings and structures. To date, there are practically no approaches that comprehensively take into account the actual work of reinforced concrete structures, taking into account the deterioration of their dynamic resistance under the influence of the factors described above, which can lead to significant damage and socio-economic losses. Thus, the relevance of the solution of the set problem is to determine the strength and deformation characteristics of load-bearing reinforced concrete structures under the CSE, which will significantly improve the level of safety and security of the country's fixed assets as a whole. The paper presents the performance of compressed reinforced concrete elements under the combined action of corrosion and high temperature in fire.

Keywords: reinforced concrete, column, corrosion, temperature effects, bearing capacity

Funding. The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project "Assessment of the Technical Condition of Buildings Based on Resilience and Risk" No. FSWG-2024-0003).

For citation. Tamrazyan A.G. Bearing Capacity of Compressed Reinforced Concrete Elements under Combined Special Effects. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2025, no. 3, pp. 146–152, doi: 10.22337/2077-9038-2025-3-146-152.

На смену традиционным методам расчёта конструкций на прочность, ресурс, износостойкость и надёжность, которые используются на протяжении более ста лет, приходят современные методы расчёта живучести, безопасности, риска и защищённости при различных сочетаниях нескольких воздействий. Углублённый анализ разрушений железобетонных конструкций зданий при современных вызовах, характерных для комбинированных особых воздействий (КОВ), таких как высокоинтенсивные динамические нагрузки различного характера в сочетании с огневыми воздействиями и коррозионными повреждениями, указывает на необходимость совершенствования применяемых научных, инженерных решений в области обеспечения безопасности и защищённости строительных объектов с современными уровнями рисков.

Решение проблем обеспечения защищённости строительных конструкций и объектов от КОВ закладывает научные основы создания и развития нового комплексного подхода к объективной оценке по критериям риска, как состояния существующих, так и проектируемых перспективных проектов в будущем.

Результаты выполненных исследований показывают необходимость перехода на научно обоснованные принципы обеспечения и повышения защищённости природно-техногенной сферы жизнедеятельности населения и общества в целом от негативных процессов и явлений, понижающие в конечном счёте стратегические риски государства.

Защищённость строительных объектов возможна на основе фундаментальных, поисковых и прикладных исследований КОВ и процессов, создания новой критериальной базы безопасности и рисков.

В качестве примера рассмотрим несущую способность сжатых железобетонных элементов при коррозионном повреждении и огневом воздействии.

Железобетонные конструкции, подвергающиеся комбинированному воздействию высоких температур и коррозии, испытывают значительное снижение несущей способности

вследствие взаимосвязанного негативного эффекта данных факторов [1–3].

Известно, что при нагревании бетона выше 500 °С существенно меняется его структура: появляются многочисленные микротрещины, происходит дегидратация и трансформация кристаллических структур цементного камня и заполнителя [4]. Это вызывает значительное снижение прочности и жесткости элементов, которое, в отличие от стали, не восстанавливается после охлаждения [5–7]. Прочностные свойства и упругие характеристики арматурных стержней, нагретых до аналогичных температур, частично восстанавливаются при последующем охлаждении [8].

Однако влияние коррозии арматуры на огнестойкость железобетонных конструкций остаётся неизученным. Так, по результатам исследований [9], наличие коррозионных повреждений приводит к дополнительному снижению сцепления арматуры с бетоном и несущей способности конструкции ещё до начала огневого воздействия. Кроме того, коррозионное повреждение бетона существенно ухудшает способность конструкций сопротивляться высоким температурам, так как разрушение структуры бетона и арматуры под воздействием агрессивной среды увеличивает пористость и способствует быстрому проникновению тепла внутрь сечения [10].

Значительный интерес представляет анализ совместного воздействия коррозионных и температурных факторов на работу арматуры в бетоне. Согласно исследованиям, представленным в работе [11], коррозия стальной арматуры существенно влияет на её пластические свойства, а также на характер взаимодействия с окружающим бетоном. При этом потеря сцепления особенно критична в условиях нагрева, так как в процессе пожара дополнительно уменьшается адгезия вследствие термической деформации и разрушения контактного слоя бетона вокруг стержней, что может привести к локальной потере устойчивости арматуры в пределах разрушения защитного слоя [12; 13; 14].

Отдельно следует выделить результаты экспериментов, подтверждающих, что после воздействия огня и коррозии железобетонные конструкции демонстрируют значительное снижение жёсткости и несущей способности при последующих эксплуатационных нагрузках, в частности, при динамических воздействиях или разгрузке [15]. В этих условиях наиболее адекватными являются расчётные модели, учитывающие одновременное влияние высоких температур, скорости охлаждения и начальной степени коррозии элементов.

Рассматривая работу железобетонных конструкций, в которых уже присутствует коррозия, под действием огневого воздействия, становится очевидным, что несущая способность этой конструкции будет заметно снижаться, при увеличении процента коррозии бетона и арматуры [2; 16]. При появлении трещин от продуктов коррозии арматуры, защитный слой бетона перестаёт препятствовать прогреву рабочей арматуры [3]. Находясь в условиях пожара, корродированный бетон изначально обладает меньшим сопротивлением сжатию и растяжению, чем бетон, не подвергшийся коррозии [2; 17]. Следовательно, переход конструкции в предельное состояние наступит значительно раньше [18].

Таким образом, для оценки технического состояния и живучести железобетонных конструкций важной задачей является анализ влияния коррозионных повреждений на огнестойкость [3; 15; 19].

Для случая внецентренного сжатия разобьём поперечное сечение колонны на участки толщиной 25 мм, вычислим среднюю температуру в каждой части для определения коэффициентов условий работы.

В качестве толщины защитного слоя бетона принимаем расстояние от поверхности бетона до поверхности арматуры. В расчётах на огнестойкость учитывается расстояние от поверхности бетона до оси арматурного стержня. Максимальная разница температур поперечного сечения стержня составила ~3%, чем для данных расчётов можно пренебречь. В общем виде расчёт прочности нормальных сечений выполняют по схеме на рисунке 1.

Решение уравнений сводится к предположению, что в бетоне достигнуты предельные деформации. Затем подби-

рают такую высоту сжатой зоны, которая бы обеспечивала равенство внешних и внутренних продольных сил. А потом определяют моменты внутренних сил и сравнивают эти моменты с моментами внешних сил, на основании чего прочность либо обеспечена, либо нет.

В расчёте внецентренно-сжатых железобетонных элементов эксцентриситет значительно влияет на несущую способность конструкции. Поэтому при расчёте учитываем случайный эксцентриситет¹.

Расчёт по прочности внецентренно сжатых элементов прямоугольного сечения с учётом коррозионных повреждений и температуры прогрева бетона производится по формуле:

$$N \cdot e \leq \sum_{i=1}^n (R_{b,i,t} \cdot b_i \cdot x_i \cdot (h_{0,i} - 0,5x_i)) + \sum_{j=1}^m (R_{sc,j,t} \cdot A'_{s,j,corr} \cdot (h_{0,j} - a'_j)), \quad (1)$$

где N – продольная внешняя сила, кН; x_i – высота сжатой зоны сечения.

Жёсткость железобетонного элемента в предельной по прочности стадии для каждого элемента сечения с учётом пониженных характеристик бетона и арматуры определяется по формуле:

$$D = k_b \cdot \sum_{i=1}^n (E_{b,i} \cdot I_{b,i}) + k_s \cdot \sum_{j=1}^m (E_{s,j} \cdot I_{s,j}), \quad (2)$$

где E_{st} и E_{bt} – модули упругости арматуры и бетона соответственно; $I_{b,i}$ и $I_{s,j}$ – моменты инерции бетона и арматуры соответственно с учётом коррозии относительно оси, проходящей через центр тяжести сечения; k_s – коэффициент, равный 0,7; k_b – коэффициент, определяемый по формуле:

$$k_b = \frac{0,15}{\varphi_l(0,3 + \delta_e)}, \quad (3)$$

где δ_e – относительное значение эксцентриситета продольной силы e_0/h , принимаемое не менее 0,15 и не более 1,5; φ_l – коэффициент влияния длительности действия нагрузки:

¹ СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения»: актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – 87 с. (<https://docs.cntd.ru/document/554403082>).

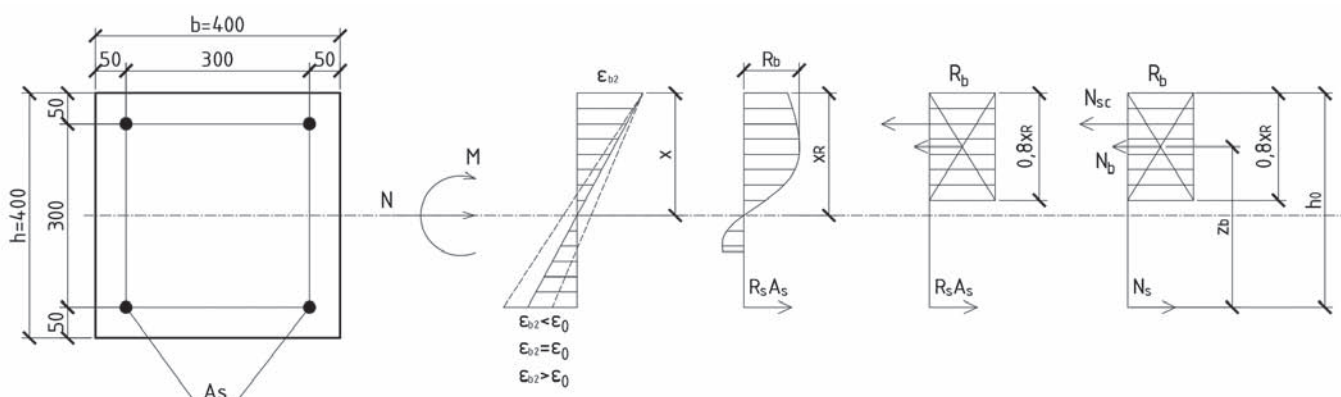


Рис. 1. Напряжённо-деформированное состояние внецентренно-сжатого железобетонного элемента

$$\varphi_l = 1 + \frac{M_{l1}}{M_1}, \quad (4)$$

где M_1 и M_{l1} – моменты относительно центра наиболее растянутой или наименее сжатой арматуры соответственно от действия полной нагрузки и от действия постоянных и длительных нагрузок.

В первом приближении принимаем процент армирования $\mu=0,004$. Тогда жёсткость железобетонной колонны будет определяться согласно [12] по формуле:

$$D = \sum_i \left(E_{bt,i} b_i h_i^3 \left[\frac{0,0125}{\varphi_l(0,3+\delta_e)} + 0,175 \mu \alpha \left(\frac{h_{0,i}-a'_i}{h_i} \right)^2 \right] \right), \quad (5)$$

где $\alpha = E_s / E_b$.

Относительная величина продольной силы и относительный изгибающий момент:

$$\alpha_n = \frac{N}{\sum_i R_{bt,i} b_i h_{0t,i}}, \quad (6)$$

$$\alpha_{ml} = \frac{Ne}{\sum_i R_{bt,i} b_i h_{0t,i}^2}, \quad (7)$$

$$\delta = \frac{a'_s}{h_0}. \quad (8)$$

При условии равенства внешнего момента и предельного момента сопротивления сечения в элементе формируется пластический шарнир. Данный механизм актуален главным образом для внецентренно-сжатого элемента. Пластический шарнир в огнестойкости – это локализованная пластическая деформация в сечении (обычно в середине или у опоры колонны), когда сечение полностью исчерпало свою несущую способность при изгибе при данном усилии. В колонне с большим эксцентриситетом нагрузка N_d создаёт изгибающий момент $M = N_d \cdot e$ (при условии, что колонна шарнирно опёрта; при наличии защемления – дополнительные моменты). При прогреве сечения до определённой температуры его изгибная жёсткость EI падает, а предельный момент M_u (τ) – максимальный момент, который сечение может нести – также снижается. Пластический шарнир образуется, когда в сечении достигаются предельные деформации одновременно в сжатой и в растянутой зоне: бетон в сжатой зоне достигает предельной деформации ε_{cu} (t), а арматура в растянутой зоне – текучести (или предельного удлинения ε_{su} (t)). В этот момент сечение уже не может сопротивляться увеличению изгибающего момента – происходит пластический поворот. Для колонны это означает, что она теряет способность нести дополнительный изгиб и, как правило, разрушается (если это одиночный шарнир в центральной зоне при центральном сжатии – колонна превращается в механизм, если же шарнир у опоры, то при верхнем шарнире или потере устойчивости верхней части также наступит обрушение).

Условие формирования пластического шарнира можно записать через равенство внешнего момента M_d и предельного момента сопротивления сечения M_u при данных N_d и температуре. Например, для прямоугольного сечения с

рабочей арматурой в растянутой и сжатой зонах внутренних изгибающий момент при достижении предельных напряжений определяется:

$$M_u(t) = R_{b,t} b x(t) \left(h_0 - \frac{x(t)}{2} \right) + R_{s,t} A'_s (h_0 - a') + R_{s,t} A_s (d - h_0 - a), \quad (9)$$

где $x(t)$ – высота сжатой зоны бетона, определяется из равновесия продольных сил:

$$N_d = R_{b,t} b x(t) + R_{s,t} A'_s - R_{s,t} A_s. \quad (10)$$

Критическое состояние по образованию пластического шарнира наступает, когда внешний изгибающий момент от нагрузки равен предельной величине: $M_d = M_u(t)$, сводится к условию $N_d e = M_u(t)$. Отметим, что для центрально-сжатых элементов $M_d \approx 0$, поэтому образование пластического шарнира как отдельный механизм не рассматривается.

Результаты расчета предельного момента приведены в таблице 1.

Графики этих зависимостей представлены на рисунках 2 и 3.

Из рисунков видно, что при увеличении времени огневого воздействия снижение несущей способности колонны сначала происходит линейно (до 15 минут), но затем приобретает экспоненциальный характер. Это связано с уско-

Таблица 1. Значения предельного изгибающего момента колонны от уровня коррозии и температуры

Процент коррозии, %	0	15	30
Время огневого воздействия, мин.	0	15	30
0	15,6 кН·м	12,9 кН·м	10,6 кН·м
15	15,1 кН·м	11,9 кН·м	8,6 кН·м
30	13,3 кН·м	9,6 кН·м	6,9 кН·м
45	6,7 кН·м	5,0 кН·м	3,5 кН·м

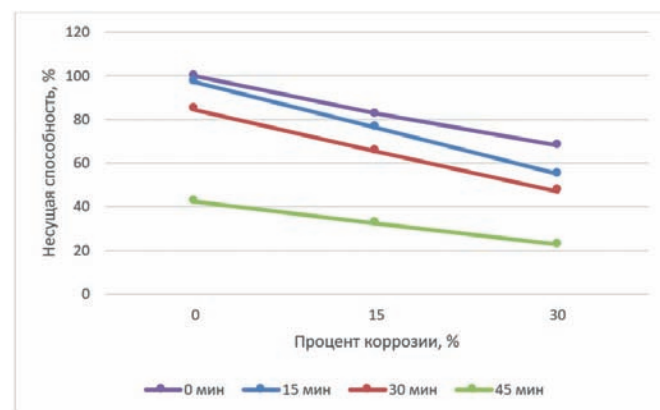


Рис. 2. Несущая способность колонны при разном уровне коррозионного повреждения для различного времени огневого воздействия

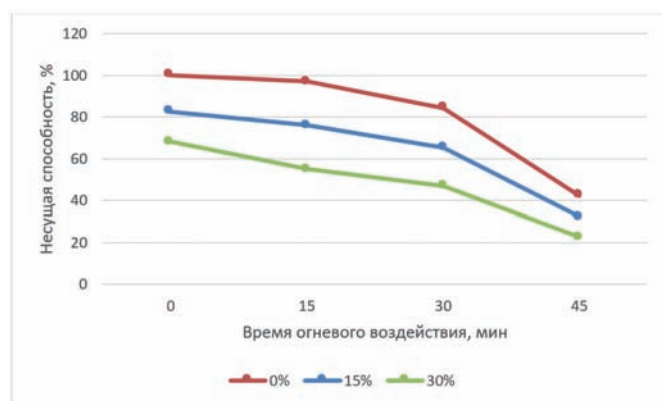


Рис. 3. Несущая способность колонны при разном времени огневого воздействия для различных уровней коррозионного повреждения

ренной деградацией бетона и арматуры при температурах выше 450–600°C.

При значительном коррозионном повреждении происходит разрушение защитного слоя бетона, снижение сцепления между бетоном и арматурой, уменьшение эффективного сечения арматуры и ухудшение условий теплопередачи. Эти процессы способствуют ускоренному нагреву арматуры и более раннему достижению критических температур, при которых существенно снижаются прочностные и деформационные характеристики стали.

* * *

1. При разном времени огневого воздействия изменения процента коррозии приводит к линейному уменьшению несущей способности железобетонного сжатого элемента.

2. Коррозия значительно усиливает влияние температуры: при 45 мин. прогрева колонна с 30-процентной коррозией теряет более 77% несущей способности, в то время, как без коррозии снижение несущей способности составляет менее 58%.

3. При уменьшении сцепления между материалами резко возрастают риски потери устойчивости продольной арматуры из-за отсутствия бетонного покрытия и перераспределения усилий с бетона на арматуру. Всё это приводит к ускоренному снижению несущей способности коррозионно-повреждённой колонны при длительности пожара более 30 мин.

Список источников

1. Леденев, А.А. Влияние процессов коррозии арматурной стали на долговечность и огнестойкость железобетонных конструкций / А.А. Леденев, В.Т. Перцев. – Текст : непосредственный // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2015. – № 2 (15). – С. 15–19.

2. Тамразян А.Г. Несущая способность коррозионно-повреждённых изгибаемых железобетонных элементов, подвергнутых огневому воздействию / А.Г. Тамразян. – Текст:

непосредственный // Academia. Архитектура и строительство. 2022. – № 4. – С. 130–137.

3. Fire Performance of Corroded Reinforced Concrete Columns / S. Chandra, U.K. Sharma, M. Green [и др.]. – DOI: 10.1007/s10694-023-01472-x. – Текст : электронный // Fire Technology. – 2023. – Vol. 60, № 4. – P. 2265–2295. – URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/9/2737/xml> (дата обращения 18.07.2025).

4. Experimental Investigation on Dynamic Behavior of Concrete after Exposure to Elevated Temperatures/ Yanzhi Liu, Zhi Li, Bao Jin & Jingsi Huo (2018). European Journal of Environmental and Civil Engineering 24(7): 1-17. DOI.org/10.1080/19648189.2018.1500310

5. Карпенко, Н.И. Деформирования арматуры при совместном действии нагрузок и повышенных температур до +500°C / Н.И. Карпенко, С.Н., Г.А. Моисеенко. – Текст : непосредственный // Строительство и реконструкция. – 2024. – Т. 114, № 4. – С. 3–13.

6. Корсун, В.И. Расчёт температурно-усадочных деформаций высокопрочных бетонов применительно к условиям воздействия повышенных температур / В.И. Корсун, А.О. Баранов. – Текст : непосредственный // Фундаментальные поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году : Научные труды РААСН : В 2-х томах : Том 2. – Москва : АСВ, 2020. – С. 314–321.

7. Холмянский М.М. Контакт арматуры с бетоном / М.М. Холмянский. – Москва: Стройиздат, 1981. – 184 с. – Текст: непосредственный.

8. Тамразян, А.Г. Тепломассоперенос в железобетонных колоннах при огневом воздействии с учётом стадии охлаждения / А.Г. Тамразян, В.И. Черник. – Текст : непосредственный // Строительство и реконструкция. 2024. – № 3 (113). – С. 72–82.

9. Изучение влияния дефектов железобетонных конструкций на развитие коррозионных процессов арматуры / Г.А. Смоляго, В.И. Дронов, А.В. Дронов, С.И. Меркулов. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 12. – С. 25–27.

10. Степанова, В.Ф. Влияние степени коррозионного поражения арматуры на совместную работу с бетоном / В.Ф. Степанова, Н.А. Спивак, Е.Н. Королёва. – Текст : непосредственный // Вестник НИЦ «Строительство». – 2024. – Т. 1 (40). – С. 105–116.

11. Du, Y.G. Effect of Corrosion on Ductility of Reinforcing Bars / Y.G. Du, L.A. Clark, A.H.C. Chan. – Текст : электронный // Magazine of Concrete Research. – 2005. – Vol. 57, No. 7. – P. 407–419. – URL: <https://clck.ru/3NBiHy> (дата обращения 18.07.2025).

12. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 2. Модели без учёта несплошности соединения / А.В. Бенин, А.С. Семёнов, С.Г. Семёнов, Б.Е. Мельников. – Текст : непосредственный // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 1. – С. 33–42.

13. Тамразян, А.Г. Сцепление коррозионно-поврежденных железобетонных элементов при огневом воздействии / А.Г. Тамразян, Д.С. Баряк. – DOI: 10.33979/2073-7416-2025-117-1-40-47. – Текст : непосредственный // Строительство и реконструкция. – 2025. – №1 (1). – С. 40–47.

14. Трофимов, А.В. Расчёт железобетонных элементов с учетом неупругой работы сцепления арматуры с бетоном: монография / А.В. Трофимов, И.А. Рудный. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2023. – 202 с. – Текст : непосредственный.

15. Тамразян, А.Г. Экспериментальные исследования внецентренно сжатых железобетонных элементов при кратковременных динамических нагружениях в условиях огневых воздействий / А.Г. Тамразян, Л.А. Аветисян. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 4. – С. 24–28.

16. Mishra, L. Behavior of Deteriorated Reinforced Concrete Columns under Elevated Temperatures / Mishra L., Sharma U.K. – DOI: 10.1007/s10694-023-01535-z. – Текст: электронный // Fire Technology. – 2024. – Vol. 60, № 3. – P. 1569–1607. – URL: <https://clck.ru/3NBiR3> (дата обращения 18.07.2025).

17. Numerical Modeling of Uniaxial Corroded Reinforced Concrete Columns Exposed to Fire / Ba G.Z., Wu W., Dai H., Jiao Y., Zhang J. – DOI: 10.3390/buildings14092737. – Текст : электронный // Buildings. – 2024. – Vol. 14, № 9. – Art. 2737. – URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/9/2737/xml> (дата обращения 18.07.2025).

18. Impact of Time after Fire on Post-Fire Seismic Behavior of RC Columns / U. Demir, C. Goksu, E. Binbir, A. Ilki. – Текст : электронный // Structures. – 2020. – № 26. – P. 537–548. – URL: <https://clck.ru/3NBiBG> (дата обращения 18.07.2025).

19. Тамразян А.Г. Концептуальные подходы к оценке живучести строительных конструкций, зданий и сооружений / А.Г. Тамразян. – Текст : непосредственный // Железобетонные конструкции. – 2023. – № 3. – С. 62–75.

References

1. Ledenev A.A., Pertsev V.T. Vliyaniye protsessov korrozii armaturnoy stali na dolgovechnost' i ognestoykost' zhelezobetonnykh konstruktsey [Influence of Processes of Corrosion Reinforcing Steels on Durability and Fire Resistance of Ferro-Concrete Constructions]. In: *Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MCHS Rossii*, 2015, no. 2 (15), pp. 15–19. (In Russ., abstr. in Engl.)

2. Tamrazyan A.G. Nesushchaya sposobnost' korrozionno-povrezhdennykh izgibayemykh zhelezobetonnykh elementov, podvergnutykh ognevomu vozdeystviyu [Bearing Capacity of Corrosion-Damaged Bending Reinforced Concrete Elements Exposed to Fire]. In: *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo* [Academia. Architecture and Construction], 2022, no. 4, pp. 130–137. (In Russ., abstr. in Engl.)

3. Chandra S., Sharma U.K., Green M., Gales J., Bhargava P. Fire Performance of Corroded Reinforced Concrete Columns. In: *Fire Technology*, 2023, Vol. 60, no. 4, pp. 2265–2295. DOI: 10.1007/

s10694-023-01472-x. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/9/2737/xml> (Accessed 07/18/2025). (In Engl.)

4. Experimental investigation on dynamic behavior of concrete after exposure to elevated temperatures / Yanzhi Liu, Zhi Li, Bao Jin & Jingsi Huo. In: *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2018, no. 24 (7), pp. 1–17 DOI.org/10.1080/19648189.2018.1500310

5. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Moiseyenko G.A. Diagrammy deformirovaniya armatury pri sovmestnom deystvii nagruzok i povyshennykh temperatur do +500 °C [Diagrams of Reinforcement Deformation under the Combined Action of Loads and elevated temperatures Up to +500 °C]. In: *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Building and Reconstruction], 2024, no. 4 (114), pp. 3–13. (In Russ., abstr. in Engl.)

6. Korsun V.I., Baranov A.O. Raschot temperaturno-usadochnykh deformatsiy vysokoprochnykh betonov primenitel'no k usloviyam vozdeystviya povyshennykh temperatur [Calculation of Temperature and Shrinkage Deformations of High-Strength Concrete under Conditions of Elevated Temperatures]. In: *Fundamental'nye poiskovye i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noi otrasli Rossiiskoi Federatsii v 2020 godu* [Fundamental Search and Applied Research of the RAASN on Scientific Support for the Development of Architecture, Urban Planning and the construction industry of the Russian Federation in 2019 year], Scientific works, in 2 volumes, Vol. 2. Moscow, ASV Publ., 2020, S. 314–321. (In Russ., abstr. in Engl.)

7. Kholmyanskiy M.M. Kontakt armatury s betonom [Contact of Reinforcement with Concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981, 184 p. (In Russ.)

8. Tamrazyan A.G., Chernik V.I. Teplomassoperenos v zhelezobetonnykh kolonnakh pri ognevom vozdeystvii s uchetoм stadii okhlazhdeniya [Heat and Mass Transfer in Reinforced Concrete Columns under Fire Action with Consideration of the Cooling Stage]. In: *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Building and Reconstruction], 2024, no. 3 (113), pp. 72–82. (In Russ., abstr. in Engl.)

9. Smolyago G.A., Dronov V.I., Dronov A.V., Merkulov S.I. Izucheniye vliyaniya defektov zhelezobetonnykh konstruktsey na razvitiye korrozionnykh protsessov armatury [Investigation of Influence of Defects of Reinforced Concrete Structures on Corrosion Processes of Steel Reinforcement]. In: *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2014, no. 12, pp. 25–27. (In Russ., abstr. in Engl.)

10. Stepanova V.F., Spivak N.A., Koroleva Ye.N. Vliyaniye stepeni korrozionnogo porazheniya armatury na sovmestnyuyu rabotu s betonom [Effect OF the Degree of Corrosion Damage in Reinforcing Bars on Composite Action with Concrete]. In: *Vestnik NITS "Stroitel'stvo"* [Bulletin of Science and Research Center of Construction]. 2024. T. 1 (40). S. 105–116. (In Russ.)

11. Du Y.G., Clark L.A., Chan A.H.C. Effect of Corrosion on Ductility of Reinforcing Bars. In: *Magazine of Concrete Research*,

2005, Vol. 57, no. 7, pp. 407–419. URL: <https://clck.ru/3NBiHY> (Accessed 07/18/2025). (In Engl.)

12. Benin A.V., Semenov A.S., Semenov S.G., Mel'nikov B.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa razrusheniya stsepleniya armatury s betonom Chast' 2. Modeli bez ucheta nesploshnosti soyedineniya [The Simulation of Bond Fracture between Reinforcing Bars and Concrete. Part 2. Models without Taking the Bond Discontinuity into Account]. In: *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Magazine of Civil Engineering], 2014, no. 1, pp. 33–42. (In Russ., abstr. in Engl.)

13. Tamrazyan A.G., Baryak D.S. Stsepleniye korrozionno-povrezhdennykh zhelezobetonnykh elementov pri ognemom vozdeystvii [Bonding of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Elements in Case of Fire Impact]. In: *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Building and reconstruction], 2025, no. 1 (1), pp. 40–47. DOI: 10.33979/2073-7416-2025-117-1-40-47. (In Russ., abstr. in Engl.)

14. Trofimov A.V., Rudnyy I.A. Raschet zhelezobetonnykh elementov s uchedom neuprugoy raboty stsepleniya armatury s betonom [Calculation of Reinforced Concrete Elements Taking into Account the Inelastic Work of the Adhesion of Reinforcement to Concrete], Monograph. Saint-Petersburg, SPbGASU Publ., 2023, 202 p. (In Russ.)

15. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Eksperimental'nyye issledovaniya vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov pri kratkovremennykh dinamicheskikh nagruzheniyakh

v usloviyakh ognevykh vozdeystviy [Experimental Research in Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Elements during Short-Term Dynamic Loadings under Fire Conditions]. In: *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2014, no. 4, pp. 24–28. (In Russ., abstr. in Engl.)

16. Mishra L., Sharma U.K. Behavior of Deteriorated Reinforced Concrete Columns under Elevated Temperatures. In: *Fire Technology*, 2024, Vol. 60, no. 3, pp. 1569–1607. DOI: 10.1007/s10694-023-01535-z. URL: <https://clck.ru/3NBiR3> (Accessed 07/18/2025). (In Engl.)

17. Ba G.Z., Wu W., Dai H., Jiao Y., Zhang J. Numerical Modeling of Uniaxial Corroded Reinforced Concrete Columns Exposed to Fire In: *Buildings*, 2024, Vol. 14, no. 9, Art. 2737. DOI: 10.3390/buildings14092737. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/9/2737/xml> (Accessed 07/18/2025). (In Engl.)

18. Demir U., Goksu C., Binbir E., Ilki A. Impact of Time after Fire on Post-Fire Seismic Behavior of RC Columns. In: *Structures*, 2020, no. 26, pp. 537–548. URL: <https://clck.ru/3NBiBG> (Accessed 07/18/2025). (In Engl.)

19. Tamrazyan A.G. Kontseptual'nyye podkhody k otsenke zhivuchesti stroitel'nykh konstruktsiy, zdaniy i sooruzheniy [Conceptual Approaches to Robustness Assessment of Building Structures, Buildings and Facilities]. In: *Zhelezobetonnyye konstruktsii* [Reinforced Concrete Structures], 2023, no. 3, pp. 62–75. (In Russ., abstr. in Engl.)