

УДК: 623.4

DOI: 10.53816/23061456_2022_11-12_27

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ
И ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
СПЕЦИАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ
ПОСЛЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

**METHODOLOGY FOR CALCULATING THE RESIDUAL STRENGTH
AND RESIDUAL DEFORMATIONS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES
OF SPECIAL STRUCTURES AFTER TEMPERATURE EXPOSURE**

Канд. техн. наук Д.П. Мандрица, д-р техн. наук Д.А. Авсюкевич

Ph.D. D.P. Mandritsa, D.Sc. D.A. Avsyukevich

Военно-космическая академия им. А.Ф.Можайского

В статье исследуются вопросы оценивания напряженно-деформированного состояния бетона после температурного воздействия горения топлива. Разработаны подходы к оцениванию остаточных прочностных и деформационных характеристик бетона, Снижение деформационных характеристик учитывается коэффициентом снижения модуля упругости бетона, который учитывает температуру воздействия и изменение данного коэффициента по высоте сечения сжатой зоны. Предложена методика расчета параметров остаточной прочности и остаточных деформаций железобетонных конструкций специальных сооружений после температурного воздействия. Данная методика позволяет определять коэффициент использования сечений при различных показателях прочности бетона.

Ключевые слова: эксплуатационные свойства, остаточная прочность, остаточные деформации, горение топлива, несущие конструкции, специальные сооружения.

The article investigates the issues of assessing the stress-strain state of concrete after the temperature effect of gorenje fuel. Approaches have been developed to evaluate the residual strength and deformation characteristics of concrete, the decrease in deformation characteristics is taken into account by the coefficient of reduction of the modulus of elasticity of concrete, which takes into account the temperature of exposure and the change in this coefficient in the height of the section of the compressed zone. A method for calculating the parameters of residual strength and residual deformations of reinforced concrete structures of special structures after temperature exposure is proposed. This technique allows you to determine the cross-section utilization factor for various concrete strength indicators.

Keywords: operational properties, residual strength, residual deformations, gorenje propellant, load-bearing structures, special structures.

Введение

Определение уровня эксплуатационных свойств несущих конструкций специальных сооружений (СС) после температурного воздейст-

вия горения компонентов ракетного топлива (КРТ) требует учета всех особенностей деформирования образцов бетона и арматуры. Важное значение при этом приобретает обеспечение требования огнестойкости и жаростойкости.

Под огнестойкостью бетона понимают его способность в течение непродолжительного времени сопротивляться повышенной температуре при воздействии эксплуатационных динамических нагрузок; жаростойкостью бетона — возможность сохранять его характеристики в условиях длительного воздействия повышенных температур. В этом случае необходимо не только обеспечение требуемого предела огнестойкости, но и пригодность несущих конструкций к восприятию эксплуатационных газодинамических нагрузок.

При длительном температурном воздействии горения КРТ происходит неравномерный прогрев сечений железобетонных элементов. В начале огневого воздействия при температуре до 100 °С происходит уменьшение прочности образцов бетона, что объясняется адсорбцией цементного камня и развитием существующих микротрещин при действии на бетон внешней нагрузки. С увеличением температуры при горении КРТ до 200 °С прочность на сжатие практически не меняется. Происходит дополнительная гидратация клинкерных минералов и повышение прочности заполнителей.

При дальнейшем повышении температуры при повышенной влажности 3,5 % и огневом воздействии 250 °С вероятно наступление хрупкого разрушения бетона. С повышением температуры бетона вследствие высыхания начинают образовываться трещины от температурной усадки бетона.

Вследствие такого воздействия возникают температурные напряжения, изменяются физико-механические и упругопластические свойства бетона и арматуры, и как следствие происходит снижение несущей способности рабочих сечений [1, 4, 5].

После охлаждения слои бетона, прогретые до высоких температур, не восстанавливают свои прочностные и деформативные свойства. Изгибаемые железобетонные конструкции получившие температурные деформации, получают дополнительные прогибы, перемещения и углы поворота вследствие развития температурных напряжений.

Для оценки напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций после пожара используются известные экспериментально-теоретические исследования [5–14] после высокотемпературного нагрева и остывания.

В них представлены исследования по огнестойкости, остаточной прочности и деформативности после пожара железобетонных колонн, выполненных из тяжелого бетона, легкого конструкционного керамзитобетона и из высокопрочного бетона. Разработаны аналитические методы оценки огнестойкости и остаточной прочности и деформативности колонн после пожара.

Основная часть

Для оценки уровня эксплуатационных свойств материалов и конструкций специальных сооружений после температурного воздействия горения КРТ проанализированы существующие методики расчета, которые имеют ряд ограничений [5].

1. Существующие методики могут эффективно применяться при решении ограниченного диапазона задач, поскольку механизм разрушения сечения, необходимый для определения его несущей способности, не всегда бывает известен заранее, а внутренние усилия в геометрически нелинейно деформируемых или статически неопределимых конструкциях зависят от фактических значений их жесткостных характеристик и перемещений при нагреве.

2. Существующие методики расчета огнестойкости железобетонных конструкций предусматривают анализ только предельной стадии работы элементов и не учитывают промежуточные состояния, соответствующие началу процесса трещинообразования и возникновения остаточных деформаций в бетоне и арматуре.

С учетом принятых ограничений требуются новые методики расчёта напряженно-деформированного состояния бетонных и железобетонных конструкций на основе фактических моделей деформирования образцов бетона после огневого воздействия. Данные методики позволят определять внутренние усилия в бетонных и железобетонных конструкциях по фактическим значениям прочностных и жесткостных характеристик и остаточных перемещений. Для оценки влияния параметров температурных воздействий, прочностных и деформативных характеристик бетона и арматуры используются нормируемые параметры, изложенные в работе [1–3] и нормативном документе [4].

Для определения остаточной прочности и остаточных деформаций и оценки уровня

эксплуатационных свойств материалов и конструкций воспользуемся результатами экспериментальных исследований горения КРТ и их воздействие на бетон и железобетон.

1. Относительная прочность образцов бетона по результатам экспериментальных исследований представляется в виде полиномов:

– образцы бетона В20

$$R_b(t) / R_b = -1,28 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 + 3,29 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,003 \cdot t + 1;$$

– образцы бетона В30

$$R_b(t) / R_b = -5,23 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 - 1,11 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 0,006 \cdot t + 1;$$

– образцы бетона В40

$$R_b(t) / R_b = -6,81 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 + 7,51 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 0,018 \cdot t + 1.$$

2. Коэффициент снижения модуля упругости бетона β_τ принимается равным [1–3]

$$\beta_\tau = \frac{E_{bt}}{E_b}.$$

Результаты экспериментальных исследований [5] показывают, что для тяжелых бетонов на гранитном щебне изменение модуля упругости бетона не зависит от класса бетона и имеет вид

$$\beta_\tau = 1 - \beta_0 t + 0,5\beta_1; \beta_0 = 2,5 \cdot 10^{-3} C^{-1};$$

$$\beta_1 = 3,26 \cdot 10^{-6} C^{-2}.$$

Модуль деформации бетона рассчитывается по трехлинейной диаграмме [4] при условии $R_b(t) = R_b$.

2. Изменение модуля упругости арматуры с повышением температуры учитывают коэффициентом β_s [1–3]:

$$\beta_s = \frac{E_{st}}{E_s}.$$

Исходные данные

В качестве расчетного сечения выберем сечения плиты покрытия толщиной 1,2 м. Нор-

мальное железобетонное сечение размерами $1,0 \times 1,2$ м, разбито по высоте на отдельные элементы. Схема армирования соответствует плите покрытия специального сооружения.

Методика расчета бетонных и железобетонных сечений по нелинейной деформационной модели после огневого воздействия представляется в следующем виде. Начальные данные: E_{bt}, R_{bt}, R_b [4], экспериментальные диаграммы $\sigma_b - \varepsilon_b$, начальные деформации в бетоне и арматуре $\varepsilon_{b0}, \varepsilon_{s0}$ (рис. 1).

1. Принимаем коэффициенты ν_{bi}, ν_{sj} единичными.

$$\nu_{bi} = \frac{\sigma_{bi}}{E_b \varepsilon_{bi}} = 1, \nu_{si} = \frac{\sigma_{si}}{E_s \varepsilon_{si}} = 1.$$

$$\nu_{bj} = \frac{\sigma_{bj}}{E_b \varepsilon_{bj}} = 1, \nu_{sj} = \frac{\sigma_{sj}}{E_s \varepsilon_{sj}} = 1.$$

2. Вычисляем жесткостные характеристики сечения

$$D_{11}, D_{22}, D_{12}, D_{13}, D_{23}, D_{33};$$

$$D_{11} = \sum_i A_{bi} \cdot Z_{bxi}^2 \cdot E_b \cdot \nu_{bi} + \sum_j A_{bj} \cdot Z_{sjj}^2 \cdot E_{sj} \cdot \nu_{sj};$$

$$D_{22} = \sum_i A_{bi} \cdot Z_{byi}^2 \cdot E_b \cdot \nu_{bi} + \sum_j A_{bj} \cdot Z_{syj}^2 \cdot E_{sj} \cdot \nu_{sj};$$

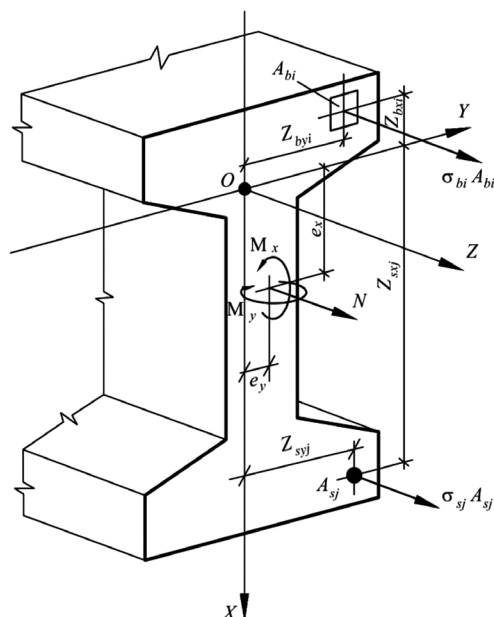


Рис. 1. Расчетная схема нормального сечения железобетонного элемента

$$D_{12} = \sum_i A_{bi} \cdot Z_{bxi} \cdot Z_{byi} \cdot E_b \cdot \nu_{bi} + \sum_j A_{bj} \cdot Z_{sxj} \cdot Z_{syj} \cdot E_s \cdot \nu_{sj};$$

$$D_{13} = \sum_i A_{bi} \cdot Z_{bxi} \cdot E_b \cdot \nu_{bi} + \sum_j A_{bj} \cdot Z_{sxj} \cdot E_s \cdot \nu_{sj};$$

$$D_{23} = \sum_i A_{bi} \cdot Z_{byi} \cdot E_b \cdot \nu_{bi} + \sum_j A_{bj} \cdot Z_{syj} \cdot E_s \cdot \nu_{sj};$$

$$D_{33} = \sum_i A_{bi} \cdot E_b \cdot \nu_{bi} + \sum_j A_{bj} \cdot E_s \cdot \nu_{sj}.$$

3. Решаем систему линейных уравнений относительно кривизны $\frac{1}{r_x}$ и деформации ϵ_0 в начале координат с определением M_x, M_y, N

$$M_x = D_{11} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{12} \cdot \frac{1}{r_y} + D_{13} \cdot \epsilon_0;$$

$$M_y = D_{12} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{22} \cdot \frac{1}{r_y} + D_{23} \cdot \epsilon_0;$$

$$N = D_{13} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{23} \cdot \frac{1}{r_y} + D_{33} \cdot \epsilon_0.$$

4. Вычисляем относительные деформации бетона и арматуры

$$\epsilon_{bi} = \epsilon_0 + \frac{1}{r_x} \cdot Z_{bxi} + \frac{1}{r_y} \cdot Z_{byi};$$

$$\epsilon_{si} = \epsilon_0 + \frac{1}{r_x} \cdot Z_{sxj} + \frac{1}{r_y} \cdot Z_{syj}.$$

5. Вычисляем напряжения для бетона на основе фактической диаграммы $\sigma_b - \epsilon_b$

$$\sigma_{bi} = E_b \cdot \nu_{bi} \cdot \epsilon_{bi}, \quad \sigma_{sj} = E_s \cdot \nu_{sj} \cdot \epsilon_{sj}.$$

6. Проверяем точность решения на уравнениях

$$M_x = \sum_i \sigma_{bi} \cdot A_{bi} \cdot Z_{bxi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj} \cdot Z_{sxj};$$

$$M_y = \sum_i \sigma_{bi} \cdot A_{bi} \cdot Z_{byi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj} \cdot Z_{syj};$$

$$N = \sum_i \sigma_{bi} \cdot A_{bi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj}.$$

7. В случае если точность определения M_x, M_y, N не обеспечивается, вычисляются векторы коэффициентов ν_{bi}, ν_{sj} исходя из ранее вычисленных векторов (матриц) напряжений и относительных деформаций для уточнения жесткостных характеристик:

$$\nu_{bi} = \frac{\sigma_{bi}}{E_b \cdot \epsilon_{bi}}, \quad \nu_{sj} = \frac{\sigma_{sj}}{E_s \cdot \epsilon_{sj}}.$$

Для повышения достоверности предложенной методики выполнено численное моделирование напряжённо-деформированного состояния нормальных сечений железобетонных с использованием нелинейных диаграмм деформирования бетона и арматуры при температурном воздействии горения КРТ. Выполнялся численный эксперимент, в качестве варьируемых факторов принимались:

Бетонные сечения $100 \times 100, 150 \times 150, 200 \times 200$ для класса бетона В20, В30, В40, В50, В60.

Железобетонные сечения 100×100 армированные симметрично $4\emptyset 5A400$. Результаты расчетов коэффициентов использования сечений k , несущей способности M_{ult} в зависимости от температуры горения КРТ представлены на рис. 2–4.

Для оценки остаточной прочности несущих конструкций покрытия выполнялся

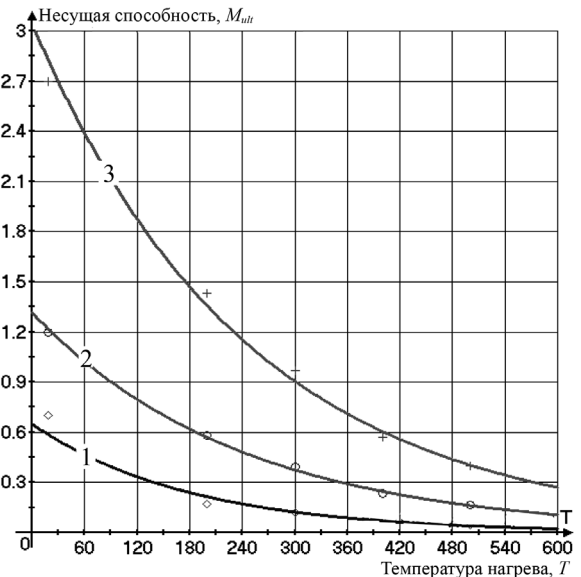


Рис. 2. График изменения несущей способности сечений бетонных элементов M_{ult} :
1 — 100×100 ; 2 — 150×150 ; 3 — 200×200

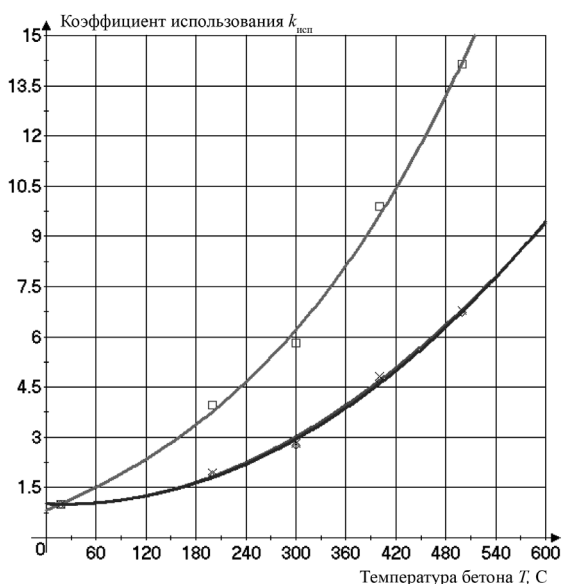


Рис. 3. График изменения коэффициента использования сечений $k_{исп}$ бетонных элементов: 1 — 100×100 ; 2 — 150×150 ; 3 — 200×200

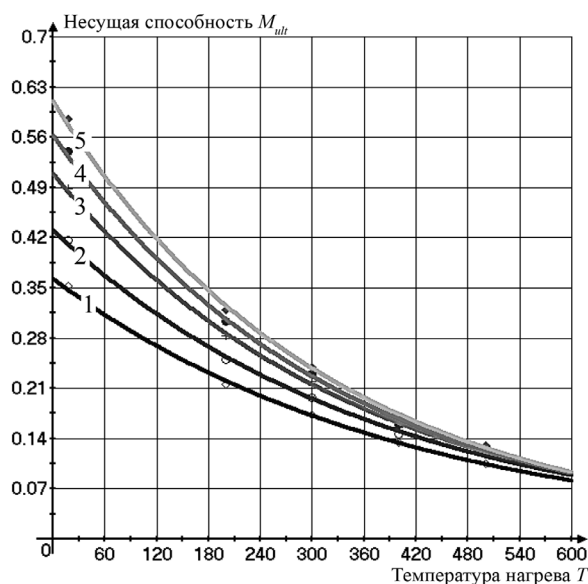


Рис. 4. Зависимость несущей способности сечений бетонных элементов M_{ult} от температуры нагрева: 1 — бетон В20; 2 — бетон В30; 3 — бетон В40; 4 — бетон В50; 5 — бетон В60

расчет железобетонного элемента размерами 1000×1200 .

Расчет выполнялся в программе макросе для Excel 2016 с использованием шаблонов нормальных сечений, полученных из Autodesk Autocad 17. Разработанная программа позволяет применять различные деформационные модели бетона, использовать начальные прогибы и начальные деформации, а также распределение характеристик

Обработка результатов численных экспериментов с использованием методов регрессионного анализа позволила построить математические модели предельного момента сечений в зависимости от температуры горения для различных размеров сечения и коэффициента использования сечений в зависимости от температуры горения КРТ:

– сечение 100×100 $M_{ult} = 0,65 \cdot e^{-0,0056 \cdot T}$,

$$k_{исп} = 1,578 \cdot 10^{-9} T^3 + 2,41 \cdot 10^{-5} T^2 - 9,638 \cdot 10^{-4} T + 1,016;$$

– сечение 150×150 $M_{ult} = 1,318 \cdot e^{-0,0042 \cdot T}$,

$$k_{исп} = 3,66 \cdot 10^{-9} T^3 + 2,769 \cdot 10^{-5} T^2 - 0,0014 T + 1,024;$$

– сечение 200×200 $M_{ult} = 3,045 \cdot e^{-0,0044 \cdot T}$,

$$k_{исп} = 3,97 \cdot 10^{-8} T^3 + 1,24 \cdot 10^{-5} T^2 + 0,01 T + 0,816.$$

График несущей способности сечений в зависимости от температуры горения для различных размеров сечения представлен на рис. 2, 3.

Математические зависимости для несущей способности M_{ult} сечений железобетонных элементов, полученные по результатам регрессионного анализа, имеют вид:

бетон класса В20 $M_{ult} = 0,363 \cdot e^{-0,0025 \cdot T}$;

бетон класса В30 $M_{ult} = 0,431 \cdot e^{-0,0026 \cdot T}$;

бетон класса В40 $M_{ult} = 0,51 \cdot e^{-0,0029 \cdot T}$;

бетон класса В50 $M_{ult} = 0,563 \cdot e^{-0,003 \cdot T}$;

бетон класса В60 $M_{ult} = 0,61 \cdot e^{-0,0031 \cdot T}$.

Результаты расчетов остаточных деформаций для различных сечений и классов бетона в представлены в таблице и на рис. 5.

Используя график изменения несущей способности сечений и значения относительной деформации, определены значения для уровня эксплуатационных свойств после огневого воздействия для сечения 200×200 (рис. 6). В результате расчетов установлено, что показатель уровня эксплуатационных свойств изменяется в диапазоне от 0,017 до 0,006.

Результаты расчетов остаточных деформаций для различных сечений и классов бетона

№ п/п		Относительная деформация $\epsilon_{b, \text{ост}}$ при размере при коэффициенте снижения прочности $\frac{R_b(t)}{R_b}$						
		0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
1	100×100	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024
2	150×150	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018
3	200×200	0,0162	0,0184	0,0212	0,025	0,0303	0,0383	0,0515

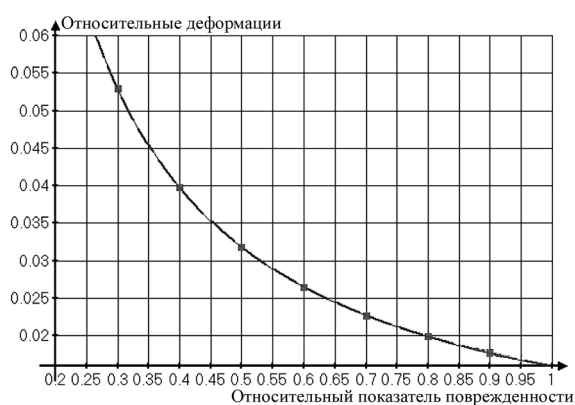


Рис. 5. Зависимость остаточных деформаций от относительной поврежденности

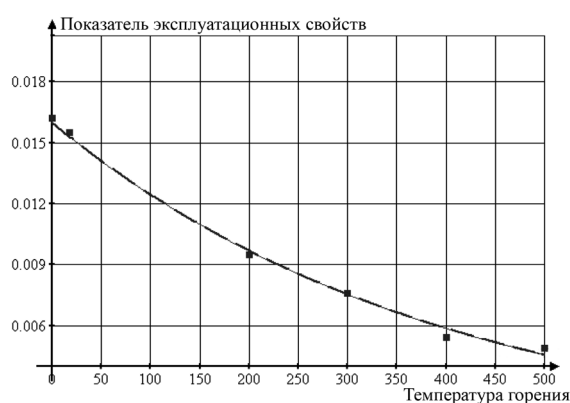


Рис. 6. Уровень эксплуатационных свойств бетона после огневого воздействия для сечения 200×200

Вывод

Полученные экспериментально-теоретические зависимости несущей способности M_{ult} и коэффициентов использования $k_{исп}$ сечений с использованием нелинейных диаграмм деформирования бетона и арматуры позволят оценивать остаточную прочность и остаточные деформации нормальных сечений бетонных и железобетонных после огневого воздействия КРТ для различных классов бетона.

Показатель эксплуатационных свойств бетона после огневого воздействия снижается до максимально низкого значения 0,007 при температуре воздействия 500 °С.

Литература

1. Милованов А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. — М.: Стройиздат, 1998. 304 с.

2. Милованов А.Ф., Камбаров Х.У. Расчет железобетонных конструкций на воздействие температуры. — Ташкент: Укитувчи, 1994. 360 с.

3. Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций. — М.: Стройиздат, 1986. 224 с.

4. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. — М., 2018.

5. Зенков Н.И., Зависнова Л.М. Прочность и деформативность бетона на гранитном заполнителе при действии высоких температур // Огнестойкость строительных конструкций. — М.: ВНИИПО МВД СССР, 1977. Вып. 5. С. 88–93.

6. Ильин Н.А. Последствия огневого воздействия на железобетонные конструкции. — М.: Стройиздат, 1979. 127 с.

7. Инструкция по расчету фактических пределов огнестойкости железобетонных строительных конструкций на основе новых требований

строительных норм и правил / ВНИИПО МВД СССР. — М., 1982. 452 с.

8. Кричевский А.П. Расчет железобетонных инженерных сооружений на температурные воздействия. — М.: Стройиздат, 1984. 248 с.

9. Чирков В.П., Зенин С.А. Прогнозирование ширины продолжительного раскрытия трещин изгибаемых элементов с учетом случайных факторов // Бетон и железобетон. — М., 2002. № 3. С. 13–15.

10. СТ СЭВ 1406-78. Конструкции бетонные и железобетонные. Основные положения проектирования / Постоянная Комиссия по сотрудничеству в области стандартизации СЭВ. — М.: Издательство стандартов, 1980. 12 с.

11. Милованов А.Ф., Кузнецова И.С. Расчет железобетонных подземных сооружений, поврежденных пожаром // Подземное пространство мира. Альманах № 1. 1999. С. 49–52.

12. Леонович С.Н., Литвиновский Д.А., Черныкевич О.Ю. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях: монография в 2 ч. Ч. 1. Под ред. С.Н. Леоновича. — Минск: БНТУ, 2016. 393 с.

13. Леонович С.Н., Пирадов К.А., Попов О.В. Расчет долговечности бетона при температурных, влажностных и силовых воздействиях на основе механики разрушения: метод. пособ. для студ. строит. спец. — Минск, 2004. 32 с.

14. Куранов Д.В., Стародубцев А.Е. Оценка влияния воздействия высоких температур при пожарах на поврежденные железобетонных конструкции // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 12 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/12/60198> (дата обращения: 06.12.2022).

References

1. Milovanov A.F. Resistance of reinforced concrete structures in case of fire. — М.: Stroyizdat, 1998. 304 p.

2. Milovanov A.F., Kambarov H.U. Calculation of reinforced concrete structures on the effect of temperature. — Tashkent, Ukituvchi, 1994. 360 p.

3 Milovanov A.F. Fire resistance of reinforced concrete structures. — М.: Stroyizdat, 1986. 224 p.

4. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. Main provisions. — М., 2018.

5. Zenkov N.I., Vyaznova L.M. Strength and deformability of concrete on granite aggregate under the action of high temperatures // Fire resistance of building structures. — М.: VNIPO of the Ministry of Internal Affairs of the USSR, 1977. Issue 5. Pp. 88–93.

6. Ilyin N.A. Consequences of fire impact on reinforced concrete structures. — М.: Stroyizdat, 1979. 127 p.

7. Instructions for calculating the actual fire resistance limits of reinforced concrete building structures based on new requirements of building codes and regulations / VNIPO of the Ministry of Internal Affairs of the USSR. — М.: 1982. 452 p.

8. Krichevsky A.P. Calculation of reinforced concrete engineering structures for temperature effects. — М.: Stroyizdat, 1984. 248 p.

9. Chirkov V.P., Zenin S.A. Forecasting the width of long-term crack opening in bending elements, taking into account random factors // Concrete and reinforced concrete. — М., 2002. No. 3. Pp. 13–15.

10. ST SEV 1406-78. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions of the design / Permanent Commission for cooperation in the field of standardization of the CMEA. — М.: Publishing house of standards, 1980. 12 p.

11. Milovanov A.F., Kuznetsova I.S. Calculation of reinforced concrete underground structures damaged by fire // Underground space of the world. Almanac No. 1. 1999. Pp. 49–52.

12. Leonovich S.N., Litvinovsky D.A., Chernyakevich O.Yu. Strength, crack resistance and durability of structural concrete under temperature and corrosion effects: a monograph in 2 parts. Part 1. Ed. S.N. Leonovich. — Minsk: BNTU, 2016. 393 p.

13. Leonovich S.N., Piradov K.A., Popov O.V. Calculation of the durability of concrete under temperature, humidity and force effects based on fracture mechanics: method. allowance for stud. builds. specialist. — Minsk, 2004. 32 p.

14. Kuranov D.V., Starodubtsev A.E. Evaluation of the impact of high temperatures during fires on damaged reinforced concrete structures // Modern scientific research and innovation. 2015. No. 12 [Electronic resource]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/12/60198> (date of access: 12/06/2022).