

А.А. МИНАСЯН

Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация

КОЭФФИЦИЕНТЫ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМАЦИИ АРМАТУРЫ И БЕТОНА КОРРОЗИОННО–ПОВРЕЖДЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ

Аннотация

Введение. На практике для выполнения расчетов по определению несущей способности железобетонных плит в стадии трещинообразования учитывается работа бетона между трещинами в растянутой зоне.

В данной работе приведены результаты натурных испытаний поврежденных сборных железобетонных плит перекрытий для определения коэффициентов В.И. Мурашева – неравномерности деформаций арматуры ψ_s в зоне растяжения и бетона ψ_b в зоне сжатия для коррозионно-поврежденных плит в стадии трещинообразования.

Цель работы: определение коэффициентов неравномерности деформации арматуры и бетона опытным путем коррозионно-поврежденных железобетонных перекрытий в стадии трещинообразования.

Материалы и методы. В статье описывается методология постановки эксперимента по измерению деформаций арматуры и бетона, прогибов плит, ширины раскрытия трещин, описываются параметры испытательных установок.

Результаты. В работе в графическом виде приведены основные результаты экспериментальных исследований.

Выводы. Исследования показывают, что с появлением трещин коэффициент ψ_{sx} сначала возрастает, а потом стабилизируется. Коэффициент ψ_{bx} сразу после образования трещин сначала незначительно возрастает, далее более плавно уменьшается.

Ключевые слова: неравномерность деформаций арматуры, неравномерность деформаций бетона, коэффициент упругости бетона, коррозионно-поврежденные железобетонные плиты

Для цитирования: Минасян А.А. Коэффициенты неравномерности деформации арматуры и бетона коррозионно-поврежденных железобетонных плит перекрытия // Бетон и железобетон. 2023. № 5/6 (619). С. 56–61. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-5/6\(619\)-56-61](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-5/6(619)-56-61)

Вклад авторов

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 14.11.2023

Поступила после рецензирования 15.12.2023

Принята к публикации 21.12.2023

A.A. MINASYAN

Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

COEFFICIENTS OF THE IRREGULARITY OF THE DEFORMATION OF THE REINFORCEMENT AND THE CONCRETE OF CORROSION DAMAGED REINFORCED CONCRETE SLABS

Abstract

Introduction. In practice, to perform calculations to determine the bearing capacity of reinforced concrete slabs at the stage of cracking, the work of concrete between cracks in the tension zone is taken into account. This paper presents the results of full-scale tests of damaged precast reinforced concrete floor slabs to determine the coefficients V.I. Murashev – uneven deformations of reinforcement ψ_s in the tension zone and concrete ψ_b in the compression zone for corrosion-damaged slabs in the stage of cracking.

The aim of the work: to determine the coefficients of uneven deformation of reinforcement and concrete experimentally for corrosion-damaged reinforced concrete floors at the stage of cracking.

Materials and methods. The article describes the methodology for setting up an experiment to measure the deformations of reinforcement and concrete, slab deflections, crack opening widths, and describes the parameters of the testing installations.

Results. The work presents the main results of experimental studies in graphical form.

Conclusions. Research shows that with the appearance of cracks, the coefficient ψ_{sx} first increases and then stabilizes. The coefficient ψ_{bx} immediately after the formation of cracks first increases slightly, then decreases more gradually.

Keywords: unevenness of deformations of reinforcement, unevenness of deformations of concrete, coefficient of elasticity of concrete, corrosion-damaged reinforced concrete slabs

For citation: Minasyan A.A. Coefficients of the irregularity of the deformation of the reinforcement and the concrete of corrosion damaged reinforced concrete slabs. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2023, no. 5/6 (619), pp. 56–61. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-5/6\(619\)-56-61](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-5/6(619)-56-61)

Author contribution statements

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 14.11.2023

Revised 15.12.2023

Accepted 21.12.2023

Коэффициент ψ_s характеризует работу растянутого бетона между трещинами, определяется как отношение в зоне чистого изгиба средних удлинений растянутой арматуры к ее удлинению в сечении сразу после образования трещин [1–3].

Коэффициент ψ_b определяется как отношение средних деформаций на сжатой грани бетона между трещинами к деформациям бетона над трещинами.

Основное внимание в экспериментальных исследованиях уделялось изучению особенностей работы конструкций от начала проявления неупругих свойств бетона и арматуры, включая стадию трещинообразования и полного разрушения.

Деформация арматуры в сечениях с трещинами определялась с учетом ширины раскрытия трещин. Проведены измерения средней деформации растянутой арматуры и крайнего волокна сжатого бетона перед и сразу после образования трещин. Коэффициенты ψ_{sx} , ψ_{sy} и ψ_{bx} , ψ_{by} определялись по отношению:

$$\psi_{sx} = \frac{\varepsilon_{scx}}{\varepsilon_{sx}}; \psi_{bx} = \frac{\varepsilon_{bcx}}{\varepsilon_{bx}}; \psi_{sy} = \frac{\varepsilon_{scy}}{\varepsilon_{sy}}; \psi_{by} = \frac{\varepsilon_{bcy}}{\varepsilon_{by}}, \quad (1)$$

где ε_{scx} и ε_{scy} – средние деформации арматуры по x и y направлениям;

ε_{sx} , ε_{sy} – деформации арматуры по x , y направлениям сразу после образования трещин;

ε_{bcx} , ε_{bcy} – средние деформации крайнего волокна сжатого бетона по x , y направлениям;

ε_{bx} , ε_{by} – деформации крайнего волокна сжатого бетона сразу после образования трещин по x , y направлениям.

Исходя из условия равновесия сил, в сечении с трещиной изгибаемого железобетонного элемента значения коэффициентов ψ_{sx} , ψ_{sy} и ψ_{bx} , ψ_{by} и могут быть выражены:

$$\psi_{sx} = \frac{\varepsilon_{scx} E_{sx} A_{sx} Z_x}{M_x - N_{bsx} Z_{bpx}}; \psi_{sy} = \frac{\varepsilon_{scy} E_{sy} A_{sy} Z_y}{M_y - N_{bsy} Z_{bpy}}, \quad (2)$$

где E_{sx} , A_{sx} , Z_x , M_x , N_{bsx} , Z_{bpx} – соответственно модуль деформации, площадь арматуры, плечо внутренних сил арматуры, момент, продольная сила, плечо внутренних сил сжатого бетона по направлению оси x ; а с индексом y те же параметры по направлению y .

$$A_{sx} = A_{sx}(0) - A_{sx}(t); A_{sy} = A_{sy}(0) - A_{sy}(t),$$

где $A_{sx}(0)$, $A_{sy}(0)$ первоначальная площадь арматуры по x , y направлениям;

$A_{sx}(t)$ и $A_{sy}(t)$ – площадь коррозии арматуры по x , y направлениям.

$$\psi_{bx} = \frac{\varepsilon_{bcx} \omega v E_{bx} b x Z_x}{M_x + N_{bpx} (Z_x - Z_{bpx})}; \psi_{by} = \frac{\varepsilon_{bcy} \omega v E_{by} b y Z_y}{M_y + N_{bpy} (Z_y - Z_{bpy})}, \quad (3)$$

где ω , v , E_{bx} , b , x , Z_x , M_x , N_{bpx} , Z_x , Z_{bpx} – соответственно коэффициенты формы профиля арматуры, упругости бетона, модуль деформации, ширина конструкции, высота сжатого бетона, плечо внутренних сил арматуры, момент, продольная сила, плечо внутренних сил бетона по направлению оси x . А с индексом y те же параметры по направлению y .

$$v = v_n - b k^a, \quad (4)$$

где v_n – нормативная величина коэффициента упругости сжатого бетона;

k – относительный критерий нагружений;

$$k = \frac{M}{M_p} \text{ – для изгибаемых элементов;}$$

M и M_p – текущие и предельные значения изгибающего момента;

$b = v_n - v_p$ – разность между нормативной величиной коэффициента упругости и величиной его к моменту разрушения:

$$v_p = 270 \frac{R_{bt}(t)}{E_b(t)}, \quad (5)$$

где $R_{bt}(t)$ и $E_b(t)$ определяются для разной категории повреждения плит и приведены в [4];

a – показатель степени относительного критерия нагружения для изгибаемых элементов:

$$a = \frac{4R_{bt}(t)}{(\mu + 0,02)(R_s(t) + 600 \text{ МПа})}, \quad (6)$$

где μ – относительная величина армирования;

$R_s(t)$ – расчетное сопротивление арматуры ($R_s(t)$ и $R_{bt}(t)$ – МПа).

В зоне сжатия:

$$R_b(t) = \gamma_{RCK} R_b; \quad (7)$$

$$\gamma_{RCK} = 1 - \alpha_{RCK} \times \omega_{CK} \times k_{CK}; \quad \alpha_{RCK} = e^{\lambda_{RCK}(t-T_0)} - 1. \quad (8)$$

$$\lambda_{RCK} = \frac{1}{t} \times \frac{\delta R_b(t)}{R_b}; \quad \delta R_b(t) = R_b - R_b(t); \quad (9)$$

В зоне растяжения:

$$R_{bt}(t) = \gamma_{Rpac} R_{bt}; \quad (10)$$

$$\gamma_{Rpac} = 1 - \alpha_{Rpac} \times \omega_{pac} \times k_{pac}; \quad \alpha_{Rpac} = e^{\lambda_{Rpac}(t-T_0)} - 1; \quad (11)$$

$$\lambda_{Rpac} = \frac{1}{t} \times \frac{\delta R_{bt}(t)}{R_{bt}}; \quad \delta R_{bt}(t) = R_{bt} - R_{bt}(t), \quad (12)$$

где $\delta R_b(t)$ и $\delta R_{bt}(t)$ – значение изменения прочности бетона соответственно сжатию и растяжению в продолжительности времени t ;

R_b и R_{bt} – начальная прочность бетона соответственно сжатию и растяжению;

γ_{RCK} и γ_{Rpac} – коэффициенты остаточной прочности бетона соответственно сжатию и растяжению;

α_{RCK} и α_{Rpac} – критерии снижения прочности бетона;

ω_{CK} и ω_{pac} – критерии повреждения в зонах сжатия и растяжения бетона, зависящие от напряженного состояния

$$\frac{\sigma_b}{R_b(t)};$$

k_{CK} и k_{pac} – приведенные коэффициенты повреждения относительно базовой плиты;

T_0 – время начала развития коррозии;

λ_{RCK} и λ_{Rpac} – критерии снижения прочности бетона,

характеризующие их скорость в определенный период времени t [5].

Для выполнения расчетов по определению напряженно-деформационного состояния и несущей способности коррозионно-поврежденных железобетонных плит перекрытия коэффициенты ψ_{sx} , ψ_{sy} и ψ_{bx} , ψ_{by} определяются опытно-теоретическим и расчетным путем. После статистической обработки и корректировки дается их среднеквадратическое значение и вводится расчет по несущей способности конструкций.

Величина деформации растянутой арматуры в зоне с трещинами определяется по формуле:

$$\varepsilon_{sx} = \frac{M_x - N_x Z_x}{A_{sx} E_{sx} h_0 (1 - 0,5 \xi_x)}, \quad \varepsilon_{sy} = \frac{M_y - N_y Z_y}{A_{sy} E_{sy} h_0 (1 - 0,5 \xi_y)}, \quad (13)$$

где ξ_x , ξ_y – относительная высота сжатой зоны;
 h_0 – плечо растянутой арматуры.

В данной работе определены коэффициенты упругости бетона в зависимости от напряженного состояния и коэффициенты неравномерности деформации бетона и арматуры в стадии трещинообразования. Ниже приводятся результаты испытаний шести сборных железобетонных плит в натурных условиях [5].

Прочностные и деформационные характеристики испытываемых плит и категории повреждения приведены в работах [5, 6].

Загружение конструкций плит перекрытия производилось поэтапно. Схема расположения датчиков и измерение деформаций бетона и арматуры приведены на рис. 1.

На рис. 2 приведены коэффициенты упругости бетона для различной категории повреждения плит, полученные по формуле (4).

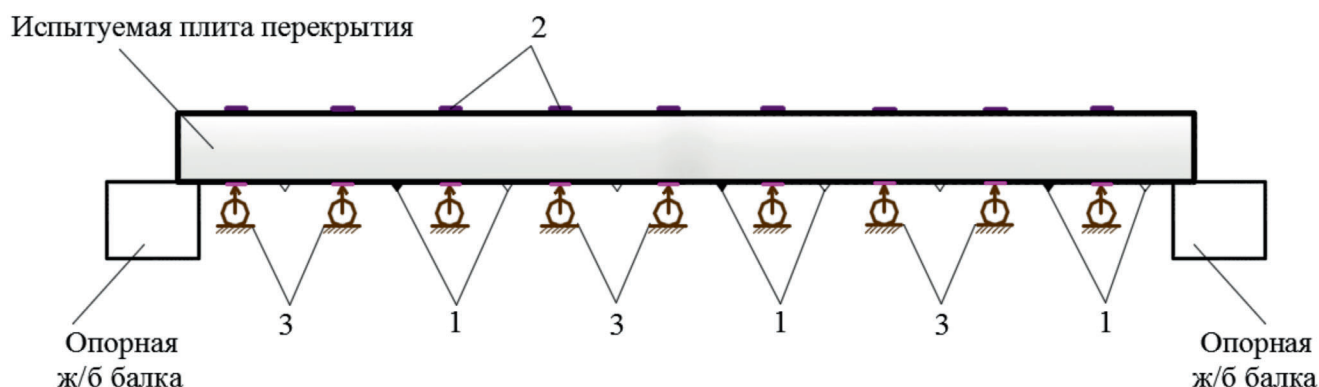


Рис. 1. Схема расположения измерительных приборов:

1 – тензометр для арматуры; 2 – тензометр для бетона; 3 – индикатор часового типа (с точностью 0,01 мм)

Fig. 1. Layout of measuring instruments:

1 – strain gauge for reinforcement; 2 – strain gauge for concrete; 3 – dial indicator (with an accuracy of 0.01 mm)

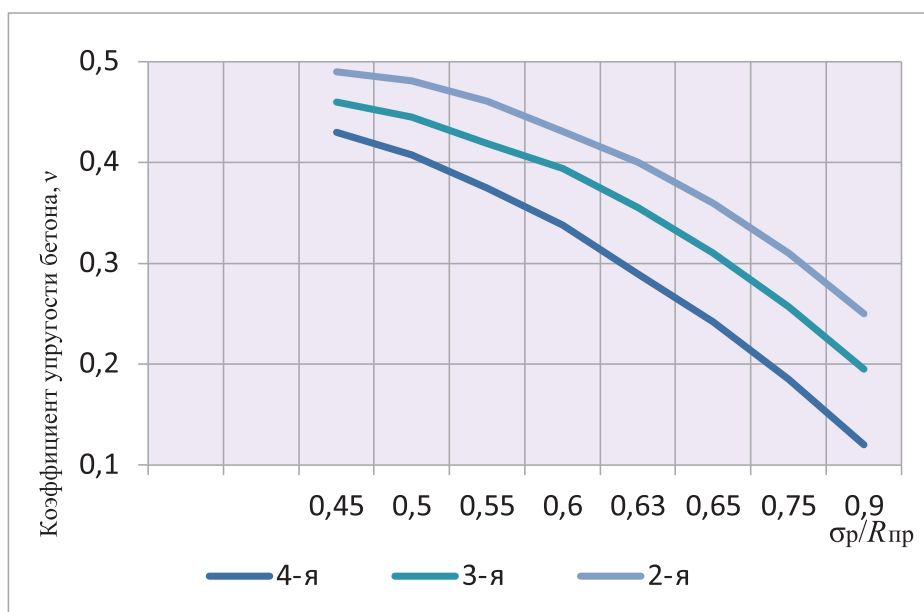


Рис. 2. Коэффициент упругости бетона для различной категории поврежденности плит

Fig. 2. Concrete elasticity coefficient for different categories of slab damage

Методика испытаний предусматривала измерение деформаций арматуры и бетона, прогибов плит, ширины раскрытия трещин. Деформации сжатой зоны бетона измерялись рычажными тензометрами с базой 25 мм и электротензодатчиками с базой 50 мм. Деформации растянутой арматуры измерялись глубинными тензометрами с базой 25 мм и прогибомерами конструкции ЦНИИСК с базой 50 мм. Размеры баз прогибомеров назначались исходя из эпюр изгибающих моментов плит. С началом развития значительных неупругих деформаций растянутой арматуры глубинные тензометры заменялись на индикаторы часового типа. Для измерения величины остаточных деформаций на ребрах рабочего арматурного стержня были нанесены риски через 20 мм для фиксации пластических деформаций. Прогибы плит измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Для оценки точности в опытах деформация арматуры в зоне растяжения определялась также из условий неразрывности бетона и стержня. Для этой цели измерялись прогибы в нижнем растягивающемся волокне бетона в 18 точках. Далее в каждой точке из условия пропорциональности прогибов и удлинения определялась деформация арматуры.

Уменьшение базы датчиков увеличивает количество в нем витков, что пропорционально точности измерения деформации арматуры, и повышает чувствительность прибора. Максимально возможная погрешность в датчиках с базой 25 мм от поперечных деформаций достигает 3 %.

Разрушение всех испытанных плит практически происходило по нормальным сечениям в зонах действия максимальных изгибающих моментов после начала раздробления бетона сжатой зоны в пролетных сечениях. Образование макротрещин в растянутой зоне бетона в пролетном сечении начиналось несколько раньше, чем в сжатой.

Наличие трещин в растянутой зоне отразилось на характере деформаций в сжатой зоне: над трещинами бетона укорачивается больше, чем между трещинами. Деформация верхней грани на участке над трещинами превышала на 25–31% деформации между трещинами.

Плита разрушилась по нормальному сечению в пролете вследствие ослабления ее сопротивления на действие изгибающего момента. Однако разрушение наступило после проявления неупругих деформаций арматуры, близких к максимально допустимым.

Полное разрушение плит происходит после разрыва арматуры в пролетном сечении.

По замеренным деформациям и расчетным поэтапным изгибающим моментам были вычислены и построены графики $\psi_{sx} - M/M_{max}$ и $\psi_{bx} - M/M_{max}$ (рис. 3 и 4, пунктирная линия соответствует расчетным значениям).

С появлением трещин коэффициент ψ_{sx} сначала возрастает, а потом равномерно уменьшается и ста-

билизируется. Коэффициент ψ_{bx} сразу после образования трещин сначала незначительно возрастает, а потом более гладко уменьшается. В наших исследованиях $\psi_{sy} = 1$ и $\psi_{by} = 1$ из-за отсутствия трещин по направлению y .

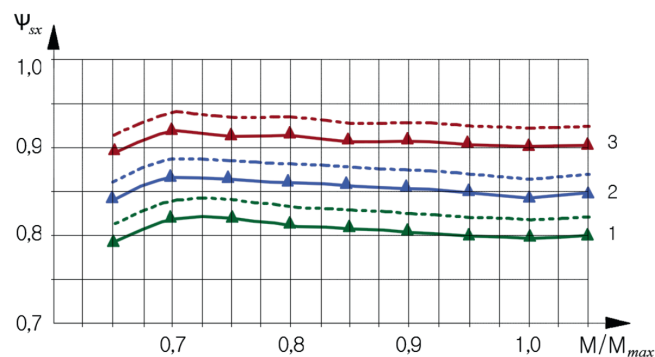


Рис. 3. Коэффициент $\psi_{sx} - M/M_{max}$
1, 2, 3 – категории повреждения плит (2-й, 3-й и 4-й)
(штрих-линия – расчетная)

Fig. 3. Coefficient $\psi_{sx} - M/M_{max}$
1, 2, 3 – categories of slab damage (2nd, 3rd and 4th)
(dashed line – calculated)

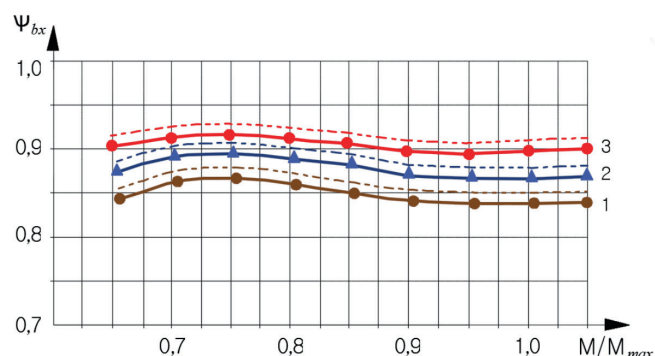


Рис. 4. Коэффициент $\psi_{bx} - M/M_{max}$
1, 2, 3 – категории повреждения плит (2-й, 3-й и 4-й)
(штрих-линия – расчетная)

Fig. 4. Coefficient $\psi_{bx} - M/M_{max}$
1, 2, 3 – categories of slab damage (2nd, 3rd and 4th)
(dashed line – calculated)

Выводы

Определение коэффициентов неравномерности деформации растянутой арматуры опытным и расчетным путем дает возможность учитывать деформации арматуры по протяженности плиты и значительно упрощает методику расчета несущей способности коррозионно-поврежденных железобетонных перекрытий в стадии трещинообразования.

Опытно-теоретические исследования показывают, что с появлением трещин коэффициент ψ_{sx} сначала возрастает, а потом стабилизируется. Значения, по данным экспериментов и расчетов, находятся в пределах 0,78–0,94.

Коэффициент ψ_{bx} сразу после образования трещин сначала незначительно возрастает, но не более 0,91. Далее более плавно уменьшается, но не ниже 0,84.

Во всех случаях расчетные значения коэффициентов ψ_{sx} и ψ_{bx} превышают экспериментальные на 3,0–3,5 %.

Список литературы

1. Карпенко Н.И., Мухамедиев Т.А., Сапожников М.А. К построению методики расчета стержневых элементов на основе диаграмм деформирования материалов. В сборнике НИИЖБ «Совершенствование методов расчета статически неопределимых железобетонных конструкций». Москва; 1987. С. 5–23.
2. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радаikin О.В. К определению деформаций изгибаемых железобетонных элементов с использованием диаграмм деформирования бетона и арматуры // *Строительство и реконструкция*. 2012. № 2. С. 11–19.
3. Мурашев В.И. Трещиноустойчивость, жесткость и прочность железобетона. Москва: Машстройиздат; 1950.
4. Бондаренко В.М. Феноменология кинетики повреждения бетона железобетонных конструкций, эксплуатируемых в агрессивной среде // *Бетон и железобетон*. 2008. № 2. С. 25–28.
5. Карпенко С.Н. Модели деформирования железобетона в приращениях и методы расчета конструкций [диссертация]. Москва; 2010. 48 с.
6. Минасян А.А. Несущая способность коррозионно-поврежденных железобетонных плит перекрытия по результатам натурных испытаний // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2018. № 6 (281). С. 19–25.
7. Минасян А.А. Определение несущей способности и напряженно-деформированное состояние сборных железобетонных перекрытий, подвергшихся циклическому замораживанию-оттаиванию // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2018. № 6. С. 53–58.
8. Пономарев О.И., Минасян А.А. Учет повреждения железобетонных конструкций реконструируемых зданий // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2010. № 2. С. 106–113.
9. Бондаренко В.М., Прохоров В.Н. К вопросу об оценке силового сопротивления железобетона повреждению коррозионными воздействиями // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 1998. № 3. С. 30–41.
10. ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. Москва: Стандартинформ; 2014.
11. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. Москва; 2012.

References

1. Karpenko N.I., Mukhamediev T.A., Sapozhnikov M.A. On the issue of the construction of a method for calculating rod elements based on material deformation diagrams. In the collection of NIIZHB "Improving methods for calculating statically indeterminate reinforced concrete structures". Moscow; 1987. pp. 5–23. (In Russian).
2. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaykin O.V. On the issue of the determination of strain reinforce concrete

flexural elements using stress-strain diagram of concrete and reinforcement. *Building and reconstruction*. 2012, no. 2, pp. 11–19. (In Russian).

3. Murashev V.I. Crack resistance, rigidity and strength of reinforced concrete. Moscow: Mashstroyizdat Publ.; 1950. (In Russian).

4. Bondarenko V.M. Phenomenology of kinetics of concrete damage of reinforced concrete structures operated in an aggressive environment. *Beton i Zhelezobeton [Concrete and Reinforced Concrete]*. 2008, no. 2, pp. 25–28. (In Russian).

5. Karpenko S.N. Models of deformation of reinforced concrete in increments and methods for calculating structures [dissertation]. Moscow; 2010. 48 p. (In Russian).

6. Minasyan A.A. Load-bearing capacity of corrosion damaged reinforced concrete floor slabs according to the results of full-scale tests. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2018, no. 6 (281), pp. 19–25. (In Russian).

7. Minasyan A.A. Determination of bearing capacity and stress-deformation state of prefabricated reinforced concrete slab after influence of freeze-thaw cycles. *Seismostoi koe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii [Earthquake engineering. Constructions safety]*. 2018, no. 6, pp. 53–58. (In Russian).

8. Ponomarev O.I., Minasyan A.A. Damages accounting of reinforced concrete structures of reconstructed buildings. *Vestnik NIC Stroitel'stvo [Bulletin of Science and Research Center of Construction]*. 2010, no. 2, pp. 106–113. (In Russian).

9. Bondarenko V.M., Prokhorov V.N. On the assessment of the strength resistance of reinforced concrete to corrosion damage. *News of higher educational institutions. Construction*. 1998, no. 3, pp. 30–41. (In Russian).

10. State Standard R 53778-2010. Buildings and constructions. Rules of inspection and monitoring of the technical condition. Moscow: Standardinform Publ.; 2014. (In Russian).

11. SP 63.13330.2012. Concrete and reinforced concrete construction. Design requirements. Updated version of SNiP 52-01-2003. Moscow; 2012. (In Russian).

Информация об авторе /

Information about the author

Арман Арамаисович Минасян, канд. техн. наук, заведующий сектором железобетонных конструкций лаборатории кирпичных, блочных и панельных зданий ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: 1747210@mail.ru
тел.: +7 (499) 174-77-94

Arman A. Minasyan, Cand. Sci (Engineering), Head of the Reinforced Concrete Structures Sector, Laboratory of Brick, Block and Panel Buildings, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: 1747210@mail.ru
tel.: +7 (499) 174-77-94