

УДК 624.071

© В. М. Попов, канд. техн. наук, доцент
© С. Н. Савин, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: popov_vladimir_m@mail.ru, savinsn@gmail.com
© М. Г. Плюснин, канд. техн. наук, ст. преподаватель
(Костромская государственная сельско-
хозяйственная академия,
пос. Караваяво, Костромская область, Россия)
E-mail: apraiser3@yandex.ru
© В. В. Белов, д-р техн. наук, доцент
(АО «Атомэнергопроект», Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: vvbelov@atomproekt.com
© М. О. Хегай, канд. техн. наук, доцент
(Хакасский государственный университет
им. Н. Ф. Катанова, Абакан, Россия)
E-mail: hegaymaksim@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-5-31-36

© V. M. Popov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© S. N. Savin, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: popov_vladimir_m@mail.ru, savinsn@gmail.com
© M. G. Plyusnin, PhD in Sci. Tech., senior lecturer
(Federal State Educational Institution of Higher
Education «Kostroma State Agricultural Academy»,
Karavaevo, Kostroma region, Russia)
E-mail: apraiser3@yandex.ru
© V. V. Belov, Dr. Sci. Tech., Associate Professor
(JSC «Atomenergoproekt», St. Petersburg, Russia)
E-mail: vvbelov@atomproekt.com
© M. O. Khagai, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Khakass State University named after N. F. Katanov,
Abakan, Russia)
E-mail: hegaymaksim@yandex.ru

ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

ENSURING THE LOAD-BEARING CAPACITY OF BENDING REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

С использованием вероятностного подхода определено влияние характера армирования изгибаемого железобетонного элемента на обеспеченность его несущей способности. Показано, что продольное армирование сжатой зоны увеличивает обеспеченность несущей способности изгибаемых железобетонных элементов при большом количестве растянутой арматуры.

Ключевые слова: нелинейная деформационная модель, изгибаемый железобетонный элемент, надежность железобетонных конструкций, вероятностный расчет.

Using a probabilistic approach, the influence of the reinforcement nature of the bending reinforced concrete element on the sufficiency of its load-bearing capacity is determined. It is shown that the longitudinal reinforcement of the compressed zone increases the sufficiency of the bearing capacity of bending reinforced concrete elements with a large quantity of tensile reinforcement.

Keywords: nonlinear deformation model, bending reinforced concrete element, reliability of reinforced concrete structures, probabilistic calculation.

Введение

Нормативная методика расчета прочности железобетонных конструкций (СП 63.13330.2018) в качестве основного метода для определения несущей способности по нормальным сечениям предписывает использование нелинейной деформационной модели. Одной из главных особенностей данного метода является деформационный

критерий исчерпания несущей способности, который заключается в увеличении значений деформаций материалов до предельных значений. Используемые на практике различные виды расчетных диаграмм « σ – ϵ » бетона, от простых двухлинейных и трехлинейных до близких к фактической диаграмме « σ – ϵ » бетона при сжатии (диаграмма Карпенко, Мурашкина, диаграмма ЕКБ и др.),

дают схожие результаты по энергетическому потенциалу материала и, соответственно, при расчетах на прочность [1].

Аналитические выражения и характерные точки расчетных диаграмм « σ – ϵ » бетона задаются при помощи его прочностных и деформационных характеристик, используемых в явном или параметрическом виде. Обеспеченность значения расчетного сопротивления бетона равна 99,86 %, а обеспеченность расчетных значений начального модуля упругости и предельных деформаций в нормативных документах не определена. По данным, приведенным в [2], обеспеченность расчетных значений деформационных характеристик бетона близка к 50 %, а значения коэффициентов вариации начального модуля упругости и предельных деформаций бетона могут достигать 20...30 % [2–4]. Таким образом, в случае существенного влияния значений деформационных характеристик на результаты расчета несущей способности обеспеченность результатов этих расчетов будет снижаться. Считается, что влияние значений предельных деформаций и начального модуля упругости бетона на несущую способность изгибаемых железобетонных элементов с одиночным армированием незначительно при $\xi \leq 0,5\xi_r$ и увеличивается с ростом относительной высоты сжатой зоны бетона [2, 4].

Параметры надежности, одним из которых является обеспеченность несущей способности, определяются в рамках вероятностного подхода. Ввиду сложности его реализации в расчетные модели часто вносятся различные допущения, позволяющие снизить объем вычислений. Например, случайной величиной считаются только прочностные характеристики бетона либо не учитывается взаимная корреляция между прочностными и деформационными характеристиками бетона, и все исходные данные считаются независимыми случайными величинами [5–10]. При определенных условиях

описанные выше упрощения могут привести к искаженной оценке обеспеченности несущей способности [11, 12]. Таким образом, оценка обеспеченности результатов расчета несущей способности изгибаемых железобетонных элементов с различными вариантами армирования по нормативной методике с использованием нелинейной деформационной модели с учетом характера статистического распределения прочностных и деформационных материалов имеет практическое значение и является актуальной.

Материалы и методы

В качестве количественной характеристики обеспеченности результатов расчета использован коэффициент обеспеченности [2, 6], который определяется как отношение величины с заданной обеспеченностью к величине, обеспеченность которой неизвестна. Несущая способность с заданной обеспеченностью определяется при помощи вероятностного подхода. Соответственно, при равных значениях несущей способности, определенных вероятностным и детерминированным методом, значение коэффициента обеспеченности равно единице. При значении коэффициента обеспеченности больше единицы обеспеченность результатов детерминированного расчета превышает заданную и имеется запас несущей способности. Если значение коэффициента обеспеченности меньше единицы, то обеспеченность результатов детерминированного расчета меньше заданной.

Несущая способность железобетонной балки определяется диаграммным методом с использованием его стандартных допущений. При детерминированном вычислении используются расчетные характеристики материалов в соответствии с СП 63.13330.2018. Вероятностный подход реализуется с помощью метода статистических испытаний по алгоритму, описанному в работах [13, 14]. Псевдослучайные распределения прочностных и деформационных характеристик ма-

териалов сформированы в соответствии с результатами эксперимента и нормативными документами [12]. Число наборов реализаций псевдослучайных исходных данных и, соответственно, результатов расчета несущей способности балки принято равным 5000. Результатом расчета является вектор псевдослучайных значений максимального изгибающего момента железобетонной балки. В случае нормального распределения случайная величина несущей способности описывается средним значением и коэффициентом вариации.

Объектом численного исследования является железобетонная балка сечением 400×200 мм, бетон В30, арматура А500. Расстояние от центра тяжести растянутой и сжатой арматуры до соответствующей грани балки принято равным 50 мм. Процент продольного армирования растянутой зоны μ_s варьируется в диапазоне 0,5...3,0 % (0,5; 1,0; 2,0; 3,0 %). Рассматриваются три варианта продольного армирования сжатой зоны μ_{sc} — без армирования, 50 % и 100 % от количества продольной арматуры в растянутой зоне балки. По среднему значению и коэффициенту вариации для каждого полученного вектора несущей способности вычисляется расчетное значение несущей способности с обеспеченностью 99,86 %. После этого для каждого рассмотренного случая определяется коэффициент обеспеченности несущей способности.

Результаты

Полученные в результате расчетов графики плотности вероятности несущей способности показаны на рис. 1. В таблице представлены средние значения и коэффициенты вариации несущей способности. Зависимость значения коэффициента обеспеченности от процента продольного армирования при рассмотренных вариантах сжатой арматуры показана на рис. 2.

При малых процентах армирования ($\mu_s = 0,5$ и $1,0$ %) армирование сжатой зоны

Средние значения и коэффициенты вариации несущей способности железобетонной балки в зависимости от ее армирования

$\mu_s, \%$	$\mu_{sc} = 0 \cdot \mu_s$	$\mu_{sc} = 0,5 \mu_s$	$\mu_{sc} = 1,0 \mu_s$
0,5	$\frac{66,6 \text{ кН} \cdot \text{м}}{5,5 \%}$	$\frac{66,7 \text{ кН} \cdot \text{м}}{5,4 \%}$	$\frac{66,8 \text{ кН} \cdot \text{м}}{5,4 \%}$
1,0	$\frac{125,5 \text{ кН} \cdot \text{м}}{5,3 \%}$	$\frac{126,9 \text{ кН} \cdot \text{м}}{5,4 \%}$	$\frac{127,3 \text{ кН} \cdot \text{м}}{5,4 \%}$
2,0	$\frac{210,5 \text{ кН} \cdot \text{м}}{8,7 \%}$	$\frac{239,1 \text{ кН} \cdot \text{м}}{5,3 \%}$	$\frac{245,8 \text{ кН} \cdot \text{м}}{5,4 \%}$
3,0	$\frac{237,8 \text{ кН} \cdot \text{м}}{11,6 \%}$	$\frac{334,6 \text{ кН} \cdot \text{м}}{6,8 \%}$	$\frac{362,7 \text{ кН} \cdot \text{м}}{5,4 \%}$

балки практически не влияет на статистическое распределение несущей способности. С увеличением количества продольной арматуры в растянутой зоне и при отсутствии армирования сжатой зоны коэффициент вариации несущей способности увеличивается. Армирование сжатой зоны в этом случае приводит не только к увеличению среднего значения максимального изгибающего момента, но и к снижению его коэффициента вариации.

Во всех рассмотренных случаях значение коэффициента обеспеченности результатов расчета несущей способности изгибаемого железобетонного элемента уменьшается с ростом армирования. При одиночном армировании и $\mu_s < 2,0$ % имеется запас несущей способности, который составляет 12 и 14 % при $\mu_s = 0,5$ % и $1,0$ % соответственно. С увеличением продольного армирования до $\mu_s = 3,0$ % значение коэффициента обеспеченности снижается до 0,95, что говорит об уменьшении обеспеченности и, как следствие, надежности элемента. Причиной этого является взаимосвязь высоты сжатой зоны бетона и количества продольной арматуры. Соответственно, при увеличении продольного армирования усиливается влияние изменчивости прочностных характеристик бетона на статистическое распределение максимального изгибающего момента, которое приводит к росту его коэффициента вариации. Следствием этого является сни-

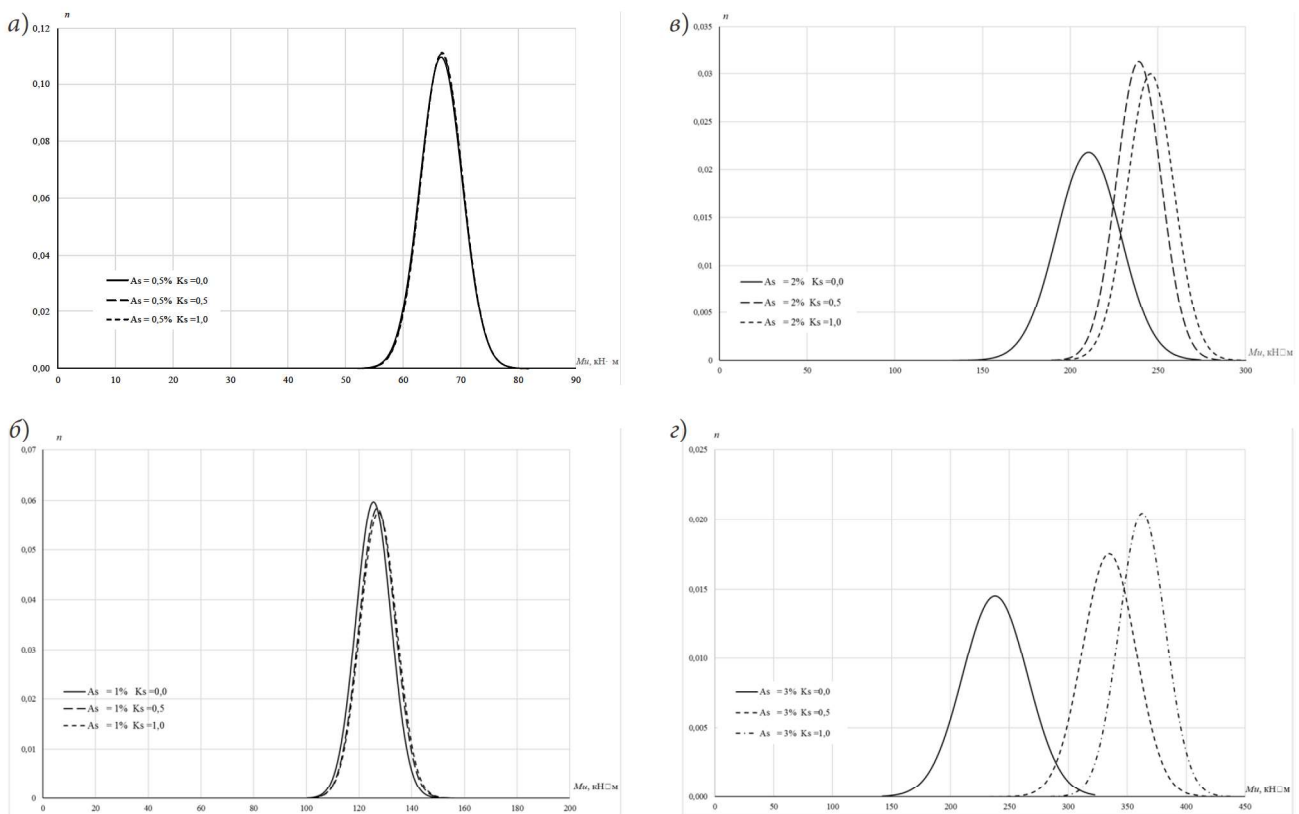


Рис. 1. Распределение несущей способности железобетонной балки:
а — при $\mu_s = 0,5\%$; б — при $\mu_s = 1,0\%$; в — при $\mu_s = 2,0\%$; г — при $\mu_s = 3,0\%$

жение несущей способности с заданной обеспеченностью.

Наличие арматуры в сжатой зоне компенсирует описанный выше эффект и позволяет повысить обеспеченность несущей способности.

Выводы

Обеспеченность несущей способности изгибаемых элементов зависит от вида и процента армирования. При большинстве рассмотренных вариантов армирования результаты расчетов несущей способности изгибаемых железобетонных элементов по нормальному сечению с помощью нелинейной деформационной модели по нормативной методике имеют достаточную обеспеченность ($K_{об} \geq 1$). Подтверждено снижение обеспеченности несущей способности при увеличении продольного армирования растянутой зоны: при $\mu_s > 2,0\%$ и отсутствии

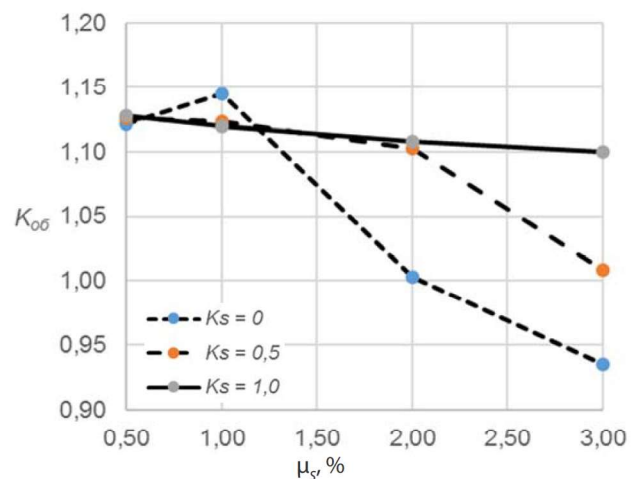


Рис. 2. Изменение коэффициента обеспеченности несущей способности железобетонной балки $K_{об}$ в зависимости от ее армирования. $K_s = \mu_{sc}/\mu_s$

продольного армирования сжатой зоны значение коэффициента обеспеченности становится меньше единицы. Продольное армирование сжатой зоны позволяет увели-

чить обеспеченность несущей способности изгибаемых железобетонных элементов при большом количестве растянутой арматуры.

Библиографический список

1. Радайкин О. В. Сравнительный анализ различных диаграмм деформирования бетона по критерию энергозатрат на деформирование и разрушение // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2019. № 10. С. 29–39.
2. Махно А. С. Надежность изгибаемых железобетонных элементов по нормальным сечениям, усиленных бетоном и арматурой: дис... канд. техн. наук. М., 2005. 174 с.
3. Yan X., Ren X., Li J. Experimental study of full process variability of concrete under uniaxial compression // Tongji Daxue Xuebao / Journal of Tongji University. 2016. Vol. 44 (5). Pp. 664–670. DOI:10.11908/j.issn.0253-374x.2016.05.002.
4. Попов В. М., Плюснин М. Г. Влияние изменчивости характеристик бетона и арматуры на несущую способность изгибаемых железобетонных элементов // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 3 (50). С. 80–84.
5. Алмазов В. О. Учет климатических воздействий при проектировании и прогнозе долговечности железобетонных пролетных строений // Автомобильные дороги. 1997. № 10. С. 11–21.
6. Исайкин А. Я. Оценка надежности статически неопределимых железобетонных конструкций на основе метода предельного равновесия: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2000. 405 с.
7. Кузеванов Д. В. Надежность внецентренно сжатых железобетонных элементов при расчете по прочности нормальных сечений: автореф. дис... канд. техн. наук. М., 2012. 24 с.
8. Овчинников И. И., Чэнь Тао, Овчинников И. Г. Вероятностное моделирование поведения армированных мостовых конструкций в агрессивных условиях эксплуатации // Транспортные сооружения. 2017. Т. 4, № 4. URL: <https://t-s.today/PDF/03TS417.pdf>. DOI: 10.15862/03TS417.
9. Селяев В. П., Селяев П. В., Петров И. С. Вероятностные методы оценки долговечности железобетонных изгибаемых элементов // Academia. Архитектура и строительство. 2009. № 3. С. 87–90.
10. Sanjeev Kumar Verma, Sudhir Singh Bhadauria, Saleem Akhtar. Probabilistic Evaluation of Service Life for Reinforced Concrete Structures // Chinese Journal of Engineering. 2014. 648438. URL: <https://doi.org/10.1155/2014/648438>.
11. Плюснин М. Г., Цыбакин С. В. Экспериментальное исследование изменчивости деформационных характеристик бетона при сжатии // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 10. С. 1390–1398. DOI 10.22227/1997-0935.2020.10.1390-1398.
12. Попов В. М., Плюснин М. Г. Экспериментальное исследование диаграмм σ – ϵ бетона при одноосном сжатии и влияния на их форму циклов замораживания и оттаивания // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 80–88. DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-4-80-88.
13. Плюснин М. Г. Оценка обеспеченности результатов расчетов несущей способности по нормальному сечению внецентренно сжатых железобетонных элементов с использованием нелинейной деформационной модели при действии циклов замораживания и оттаивания // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2 (85). С. 57–67.
14. Плюснин М. Г. Влияние циклов замораживания и оттаивания на несущую способность внецентренно сжатых элементов железобетонных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 2 (91). С. 30–35.

References

1. Radaykin O. V. *Sravnitel'niy analiz razlichnykh diagramm deformirovaniya betona po kriteriyu energozatrat na deformirovanie i razrushenie* [Comparative analysis of different concrete deformation diagrams by the criterion of energy consumption for deformation and fracture]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova – Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2019, no. 10, pp. 29–39.
2. Makhno A. S. *Nadezhnost' izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov po normal'nykh secheniyam, usilennykh betonom i armaturoy*. Diss. kand. tekhn. nauk [Reliability of bending reinforced concrete elements by normal sections reinforced with concrete and reinforcement. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2005, 174 p.
3. Yan X., Ren X., Li J. Experimental study of full process variability of concrete under uniaxial compression. *Journal of Tongji University*, 2016, vol. 44 (5), pp. 664–670. DOI:10.11908/j.issn.0253-374x.2016.05.002.
4. Popov V. M., Plyusnin M. G. *Vliyanie izmenchivosti kharakteristik betona i armatury na nesushchuyu sposobnost' izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov* [Influence of variability of concrete and reinforcement characteristics on the bearing capacity of bending reinforced concrete elements]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2015, no. 3 (50), pp. 80–84.
5. Almazov V. O. *Uchet klimaticheskikh vozdeystviy pri proektirovanii i prognoze dolgovechnosti zhelezobetonnykh proletnykh stroeniy* [Accounting for climatic influences in the design and forecasting of durability of reinforced

concrete span structures]. *Avtomobil'nye dorogi – Automobile Roads*, 1997, no. 10, pp. 11–21.

6. Isaykin A. Ya. *Otsenka nadezhnosti staticheski neopredelimykh zhelezobetonnykh konstruktsey na osnove metoda predel'nogo ravnovesiya*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Estimation of reliability of statically indeterminate reinforced concrete structures on the basis of the method of limit equilibrium. Dr. Sci. Tech. diss.] Moscow, 2000, 405 p.

7. Kuzevanov D. V. *Nadezhnost' vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov pri raschete po prochnosti normal'nykh secheniy*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Reliability of the off-center compressed reinforced concrete elements at strength calculation of normal sections. PhD in Sci. Tech. author's thesis]. Moscow, 2012, 24 p.

8. Ovchinnikov I. I., Chen' Tao, Ovchinnikov I. G. *Veroyatnostnoe modelirovanie povedeniya armirovannykh mostovykh konstruktsey v agressivnykh usloviyakh ekspluatatsii* [Probabilistic modeling of reinforced bridge structures' behavior in aggressive operating conditions]. *Transportnye sooruzheniya – Transport Structures*, 2017, vol. 4, no. 4. Available at: <https://t-s.today/PDF/03TS417.pdf>. DOI: 10.15862/03TS417.

9. Selyaev V. P., Selyaev P. V., Petrov I. S. *Veroyatnostnye metody otsenki dolgovechnosti zhelezobetonnykh izgibaemykh elementov* [Probabilistic methods of estimation of durability of reinforced concrete bending elements]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo – Academia. Architecture and Construction*, 2009, no. 3, pp. 87–90.

10. Sanjeev Kumar Verma, Sudhir Singh Bhadauria, Saleem Akhtar. Probabilistic evaluation of service life for reinforced concrete structures. *Chinese Journal of Engineering*, 2014, 648438. Available at: <https://doi.org/10.1155/2014/648438>

11. Plyusnin M. G., Tsybakin S. V. *Eksperimental'noe issledovanie izmenchivosti deformatsionnykh kharakteristik betona pri szhatii* [Experimental study of variability of deformation characteristics of concrete in compression]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MSCU*, 2020, vol. 15, no. 10, pp. 1390–1398. DOI 10.22227/1997-0935.2020.10.1390-1398.

12. Popov V. M., Plyusnin M. G. *Eksperimental'noe issledovanie diagramm $\sigma - \epsilon$ betona pri odnoosnom szhatii i vliyaniya na ikh formu tsiklov zamorazhivaniya i ottaivaniya* [Experimental study of $\sigma - \epsilon$ diagrams of concrete under uniaxial compression and the influence of freezing and thawing cycles on the form of the diagrams]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 4 (81), pp. 80–88. DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-4-80-88.

13. Plyusnin M. G. *Otsenka obespechennosti rezul'tatov raschetov nesushchey sposobnosti po normal'nomu secheniyu vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov s ispol'zovaniem nelineynoy deformatsionnoy modeli pri deystvii tsiklov zamorazhivaniya i ottaivaniya* [Evaluation of the security of the calculation results of the load-bearing capacity for the normal cross-section of eccentrically compressed reinforced concrete elements using a nonlinear deformation model under the action of freezing and thawing cycles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2021, no. 2 (85), pp. 57–67.

14. Plyusnin M. G. *Vliyanie tsiklov zamorazhivaniya i ottaivaniya na nesushchuyu sposobnost' vnetsentrenno szhatykh elementov zhelezobetonnykh konstruktsey* [The effect of freezing and thawing cycles on the load-bearing capacity of eccentrically compressed elements of reinforced concrete structures.]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2022, no. 2 (91), pp. 30–35.