

УДК 624.071

© В. М. Попов, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: popov_vladimir_m@mail.ru

© М. Г. Плюснин, ст. преподаватель
(Костромская государственная сельскохозяйственная
академия, пос. Караваяево, Костромская область, Россия)

E-mail: apraiser3@yandex.ru

© В. В. Белов, д-р техн. наук, доцент
(АО «Атомэнергoproект»,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: vvbelov@atomproekt.com

© О. Н. Хегай, канд. техн. наук, доцент
(Хакасский государственный университет
им. Н. Ф. Катанова, Абакан, Россия)

E-mail: khegaion@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-4-32-39

© V. M. Popov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: popov_vladimir_m@mail.ru

© M. G. Plyusnin, senior lecturer
(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

© O. N. Khegai, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Khakass State University
named after N. F. Katanov, Abakan, Russia)

E-mail: khegaion@mail.ru

ВЛИЯНИЕ АРМИРОВАНИЯ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ИХ НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ

THE EFFECT OF REINFORCEMENT OF BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS ON THEIR BEARING CAPACITY IN CONDITIONS OF VARIABLE FREEZING AND THAWING

Рассмотрено влияние трансформации статистических распределений прочностных и деформационных характеристик бетона при воздействии циклов замораживания и оттаивания (ЦЗО) на несущую способность изгибаемого железобетонного элемента при различных вариантах продольного армирования. С использованием вероятностного подхода определено влияние характера армирования изгибаемого железобетонного элемента на динамику его несущей способности в процессе ЦЗО. Доказано, что снижение несущей способности железобетонных балок в результате воздействия ЦЗО зависит от характера их армирования. Даны предложения по конструированию железобетонных балок, эксплуатируемых в условиях холодного климата.

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

The article considers the effect of transformation of statistical distributions of concrete strength and deformation characteristics under the influence of freezing and thawing cycles (FTC) on the load-bearing capacity of the bent reinforced concrete element under variable longitudinal reinforcement. Using the probabilistic approach, the influence of the nature of the reinforcement of the bent reinforced concrete element on the dynamics of its bearing capacity in the process of FTC is evaluated. It is substantiated that the reduction of the load-bearing capacity of reinforced concrete beams as a result of the impact of FTC depends on the nature of the reinforcement. There are offered some proposals for the construction of reinforced concrete beams operated in conditions of cold climate.

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

Введение

В соответствии с методом предельных состояний надежность железобетонных изгибаемых элементов при их расчете обеспечивается использованием прочностных характеристик материалов с заданной обеспеченностью и коэффициентов надежности, учитывающих вероятностный характер нагрузки, а также другие случайные факторы. При этом в рамках метода предельных состояний невозможно оценить надежность результатов таких расчетов. Эту задачу можно решить методами теории надежности строительных конструкций, основные положения которой выдвинуты Н. С. Стрелецким, развиты В. В. Болотиным, А. Р. Ржаницыным, Е. Везикари, А. С. Лычевым, В. Д. Райзером, Б. И. Снаркисом, Н. Н. Складневым, Ю. Д. Суховым, С. А. Тимашевым и другими учеными [1–4]. Наиболее универсальным методом вероятностного подхода является метод статистических испытаний, примеры реализации которого в расчетах железобетонных конструкций приведены в работах [5–7].

В соответствии с действующими нормами для учета воздействия циклов замораживания и оттаивания (ЦЗО) на несущую способность железобетонных конструкций используется понижающий коэффициент к расчетному сопротивлению бетона. Однако, исходя из результатов экспериментальных исследований, приведенных в научных трудах [8–19], воздействие ЦЗО приводит к изменению не только значений прочности, но и деформационных характеристик бетона. В результате ЦЗО изменяется характер статистического распределения прочностных и деформационных характеристик бетона, а интенсивность воздействия ЦЗО на несущую способность зависит от конструктивных факторов (характера и процента продольного армирования) [20–24], что не учитывается нормативной методикой.

Таким образом, задачей настоящей работы является исследование влияния транс-

формации статистических распределений прочностных и деформационных характеристик бетона при воздействии ЦЗО на несущую способность изгибаемого железобетонного элемента при различных вариантах продольного армирования.

Материалы и методы

Исследование проведено в рамках вероятностного подхода по алгоритму, описанному в работах [23, 24]. Несущая способность железобетонной балки определена диаграммным методом с использованием его стандартных допущений, вероятностный подход реализован с помощью метода статистических испытаний. Исходные псевдослучайные распределения прочностных и деформационных характеристик материалов сформированы в соответствии с результатами эксперимента и нормативными документами [20]. Смоделировано воздействие ЦЗО, приводящее к снижению нормативной прочности бетона примерно на 10 % — в пределах допуска при определении марки бетона по морозостойкости в соответствии с ГОСТ 10060–2012¹. Число наборов реализаций псевдослучайных исходных данных и, соответственно, результатов расчета несущей способности балки принято равным 5000. Таким образом, результатом расчета является вектор из пяти тысяч псевдослучайных значений максимального изгибающего момента железобетонной балки. При нормальном распределении несущей способности для ее описания достаточно определить среднее значение и коэффициент вариации.

Объектом численного исследования является железобетонная балка сечением 400 × 200 мм, бетон В30, арматура А500. Расстояния от центра тяжести растянутой и сжатой арматуры до соответствующей грани балки принято равным 50 мм. Процент продольного армирования растянутой зоны μ_s

¹ ГОСТ 10060-2012. Межгосударственный стандарт. БЕТОНЫ. Методы определения морозостойкости. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200100906>

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. В результате расчетов для каждого варианта армирования формируется вектор псевдослучайных значений несущей способности из пяти тысяч элементов, определяется среднее значение несущей способности и ее коэффициент вариации. Далее по значениям этих величин вычисляется расчетное значение несущей способности с обеспеченностью 99,86 %.

Результаты

Полученные в результате расчетов средние значения и коэффициенты вариации несущей способности представлены в табл. 1. Изменение несущей способности и коэффициента ее вариации при действии ЦЗО в зависимости от армирования (для минимального и максимального из рассмотренных процентов армирования) показано на рис. 1 и 2.

При малых процентах продольного армирования растянутой зоны балки среднее значение максимального момента и коэффициент его вариации практически не за-

висят от количества арматуры в сжатой зоне и ЦЗО. Увеличение процента армирования растянутой зоны приводит к росту влияния ЦЗО на несущую способность и ее коэффициент вариации. При $\mu_s = 3,0$ % и отсутствии армирования сжатой зоны несущая способность после воздействия ЦЗО снизилась на 20 %. Продольное армирование сжатой зоны позволяет уменьшить влияние морозной деградации бетона на несущую способность,

Таблица 1

Средние значения и коэффициенты вариации несущей способности железобетонной балки

μ_s , %	μ_s / μ_{sc}	До ЦЗО		После ЦЗО	
		M_{ult} , кН·м	v , %	$M_{ult, ЦЗО}$, кН·м	v , %
0,5	0,0	66,6	5,5	65,9	5,5
	0,5	66,7	5,4	65,9	5,4
	1,0	66,8	5,4	65,8	5,4
1,0	0,0	125,5	5,3	122,2	5,5
	0,5	126,9	5,4	125,0	5,3
	1,0	127,3	5,4	125,9	5,4
2,0	0,0	210,5	8,7	172,4	9,5
	0,5	239,1	5,3	219,9	5,9
	1,0	245,8	5,4	241,4	5,1
3,0	0,0	237,8	11,6	189,2	9,9
	0,5	334,6	6,8	299,6	6,0
	1,0	362,7	5,4	341,9	4,9

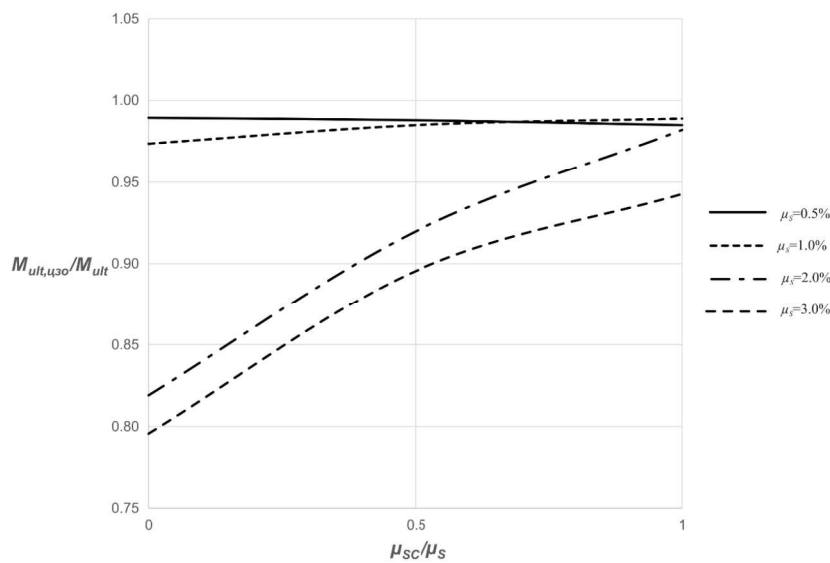


Рис. 1. Изменение средней несущей способности железобетонной балки при действии ЦЗО в зависимости от ее армирования

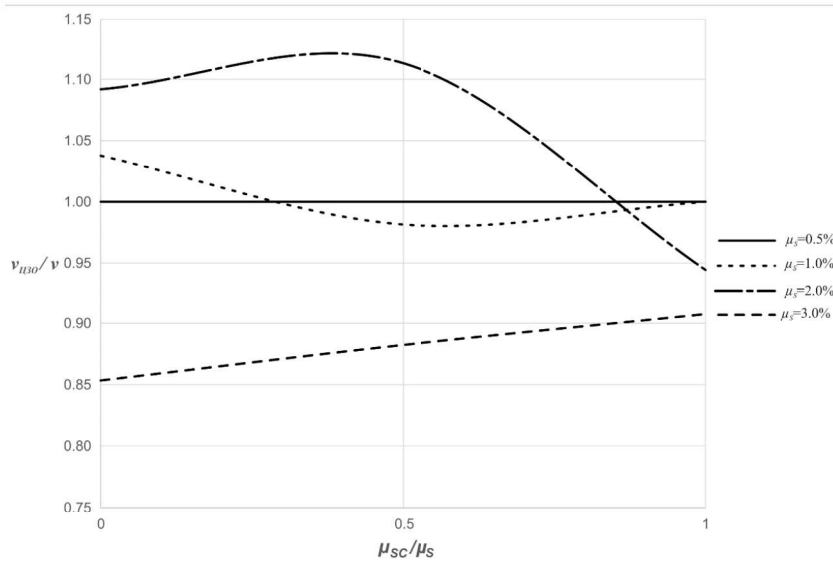


Рис. 2. Изменение коэффициента вариации несущей способности железобетонной балки при действии ЦЗО в зависимости от ее армирования

при $\mu_{sc} = \mu_s = 3,0 \%$ ее снижение составило всего 4 %.

Расчетная несущая способность с обеспеченностью 99,86 % зависит от среднего значения несущей способности и ее коэффициента вариации. Значения расчетной несущей способности показаны в табл. 2, а характер ее зависимости от ЦЗО при различном армировании на рис. 3.

Таблица 2

Расчетные значения несущей способности железобетонной балки

$\mu_s, \%$	μ_s/μ_{sc}	До ЦЗО	После ЦЗО	$M_{ult,ЦЗО}/M_{ult}$
		$M_{ult}, \text{кН}\cdot\text{м}$	$M_{ult,ЦЗО}, \text{кН}\cdot\text{м}$	
0,5	0,0	55,7	55,1	0,99
	0,5	55,9	55,1	0,99
	1,0	56,0	55,1	0,98
1,0	0,0	105,4	102,1	0,97
	0,5	106,4	104,9	0,99
	1,0	106,6	105,4	0,99
2,0	0,0	155,6	123,5	0,79
	0,5	200,8	180,9	0,90
	1,0	205,9	204,4	0,99
3,0	0,0	155,4	132,9	0,86
	0,5	266,4	245,3	0,92
	1,0	304,2	291,6	0,96

Графики на рис. 1 и 3 аналогичны за исключением того, что уменьшение расчетной несущей способности при $\mu_s = 3,0 \%$ и $\mu_{sc} = 0 \%$ в результате воздействия ЦЗО несколько меньше снижения ее среднего значения за счет изменения коэффициента вариации (11,6 % до воздействия ЦЗО и 9,9 % после ЦЗО).

Таким образом, увеличение процента продольного армирования растянутой зоны балки приводит к усилению влияния ЦЗО на ее несущую способность. Причиной этого является взаимосвязь высоты сжатой зоны бетона и процента армирования растянутой зоны балки. При малых процентах армирования растянутой зоны деградация бетона при ЦЗО компенсируется увеличением высоты сжатой зоны, что становится невозможным при больших процентах армирования. То есть деградация бетона при воздействии ЦЗО приводит к снижению максимального процента армирования μ_R . При этом необходимо учитывать, что при определении марки бетона по морозостойкости учитывается только снижение его прочности и не рассматривается влияние ЦЗО на деформационные характеристики бетона. В случае двойного армиро-

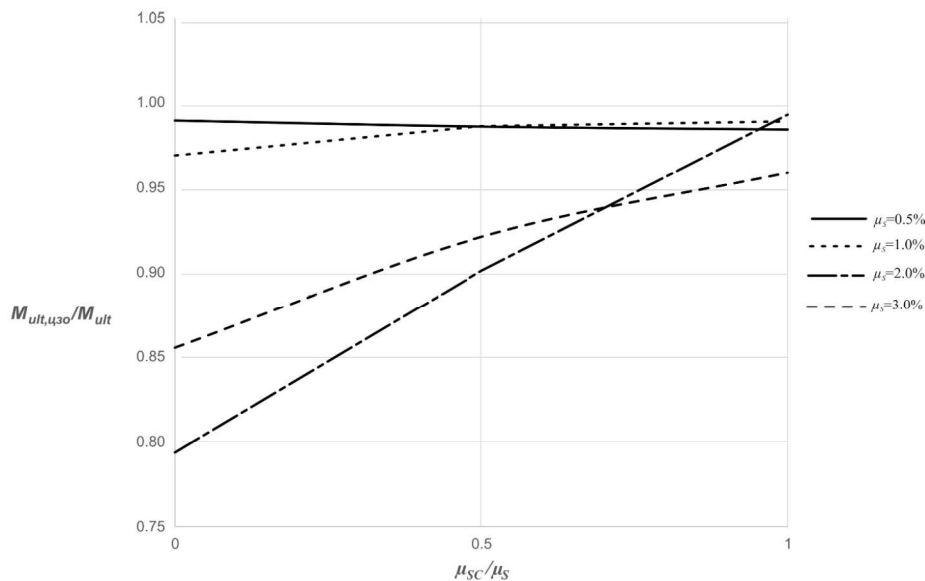


Рис. 3. Изменение расчетной несущей способности железобетонной балки при действии ЦЗО в зависимости от ее армирования

вания происходит перераспределение усилий между бетоном и сжатой арматурой, что приводит к снижению влияния ЦЗО на несущую способность железобетонной балки.

Выводы

Снижение несущей способности железобетонных балок в результате воздействия ЦЗО зависит от характера их армирования. При снижении прочности бетона в пределах, допускаемых маркой по морозостойкости, в случае одиночного армирования и проценте армирования, близкому к предельному значению, происходит существенное снижение расчетной несущей способности (14 % при $\mu_S = 3,0$ % в рассмотренном случае). При малых процентах армирования ($\mu_S = 0,5-1,0$ %) снижение несущей способности незначительно и составляет 1–3 %. Следовательно, в изгибаемых железобетонных элементах необходимо ограничивать предельный процент продольного армирования исходя из предполагаемой морозной деградации бетона.

Другим вариантом конструирования изгибаемых железобетонных элементов, эксплуатируемых в условиях ЦЗО, является использование двойного армирования. В этом

случае заметно снижается влияние ЦЗО на несущую способность железобетонной балки при больших процентах армирования (4 % при $\mu_{SC} = \mu_S = 3,0$ % в рассмотренном случае).

Библиографический список

1. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.
2. Аугусти Г., Баратта А., Кашиати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании / пер. с англ. канд. техн. наук Ю. Д. Сухова. М.: Стройиздат, 1988.
3. Болотин В. В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1988. 255 с.
4. Райзер В. Д. Вероятностные методы в анализе надежности и живучести сооружений. М.: Изд-во АСВ, 2018. 396 с.
5. Потехин И. А. Анализ напряженного состояния арки при двумерном случайно-неоднородном распределении модуля упругости материала // Современная наука: актуальные вопросы и достижения в эпоху трансформационных процессов: сб. статей по материалам 74-й Всероссийской (национальной) науч.-практ. конф. Караваево, 2023. С. 120–125.
6. Потехин И. А. Анализ деформаций в случайно-неоднородном цилиндре // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия:

Строительство. Электротехника и химические технологии. 2019. № 2 (2). С. 25–29.

7. Пшеничкина В. А., Сухина К. Н., Дубовский М. Е., Глухов А. В. Оценка надежности монолитной железобетонной плиты перекрытия при вводе здания в эксплуатацию // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 1 (90). С. 54–62.

8. Пинус Б. И. Обеспечение долговечности железобетонных конструкций при низкотемпературных воздействиях: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.17. Иркутск, 1986. 495 с.

9. Пинус Б. И., Пинус Ж. Н., Хомякова И. В. Изменение конструктивных свойств бетонов при охлаждении и замораживании // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 2 (97). С. 111–116.

10. Пинус Б. И., Корнеева И. Г., Калаишиков М. П. Статистические закономерности изменения параметров внутреннего сопротивления цементных композитов при замораживании и оттаивании // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12, № 2 (41). С. 206–213. DOI 10.21285/2227-2917-2022-2-206-213.

11. Duan A., Jin W. L., Qian J. W. Effect of freeze-thaw cycles on the stress-strain curves of unconfined and confined concrete // Mater Struct. 44 (7) (2011). Pp. 1309–1324. DOI 10.1617/s11527-010-9702-9

12. Stress-strain behaviour and acoustic emission characteristic of gangue concrete under axial compression in frost environment / Xiao Guan, Jisheng Qiu, Huitao Song, Qing Qin, Chenghua Zhang // Construction and Building Materials. Vol. 220. 30 September, 2019. P. 476–488. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.008>

13. Hanjari K. Z., Utgenannt P., Lundgren K. Experimental study of the material and bond properties of frost-damaged concrete // Cem Concr Res. Vol. 41 (3) (2011). Pp. 244–254.

14. Numerical Simulation of Static Stress-Strain Relationship and Failure Mode for Freeze-Thaw Concrete, / Xiaolin Yang, Genhui Wang, Hongzhao Li, Jiang Fan // Advances in Civil Engineering. Vol. 2020. Article ID 1921598. 9 p. 2020. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/1921598>

15. Equation for the Degradation of Uniaxial Compression Stress of Concrete due to Freeze-Thaw Damage / Xiaolin Yang, Genhui Wang, Shiwu Gao, Min Song, Anqi Wang // Advances in Materials Science and Engineering. Vol. 2019. Article ID 8603065. 8 p. 2019. URL: <https://doi.org/10.1155/2019/8603065>

16. Stress-strain model of concrete damaged by freezing and thawing cycles / M. Hasan, H. Okuyama,

Y. Sato, T. Ueda // J Adv Concr Technol. Vol. 2 (1). 2004. Pp. 89–99.

17. Sun Ming, Xin Dabo, Zou Chaoying. Damage evolution and plasticity development of concrete materials subjected to freeze-thaw during the load process // Mechanics of Materials. Vol. 139. December 2019. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103192>

18. Xuhui Zhang, Lei Wang, Jianren Zhang. Mechanical behavior and chloride penetration of high strength concrete under freeze-thaw attack // Cold Regions Science and Technology. Vol. 142. October 2017. Pp. 17–24. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.07.004>

19. Истомин А. Д., Петрова В. А. Остаточные деформации бетона железобетонных элементов при циклическом замораживании и оттаивании // Строительство и реконструкция. 2022. № 3. С. 23–31. URL: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-101-3-23-31>

20. Попов В. М., Плюснин М. Г. Экспериментальное исследование диаграмм σ - ϵ бетона при одноосном сжатии и влияния на их форму ЦЗО // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 80–88.

21. Попов В. М., Унжаков С. Н. Работа изгибаемых железобетонных конструкций в условиях знакопеременных температур // Вестник ГИ(Ф) ЯГУ. Якутск, 2004. С. 39–43.

22. Попов В. М., Черных И. В., Пинус Б. И. Влияние замораживания на несущую способность изгибаемого железобетонного элемента // Актуальные проблемы современной науки. Технические науки. Части 18–20. Архитектура. Строительство. Транспорт: труды 4-й Международной конференции молодых ученых и студентов. Самара, 2003. С. 56–58.

23. Плюснин М. Г. Оценка обеспеченности результатов расчетов несущей способности по нормальному сечению внецентренно сжатых железобетонных элементов с использованием нелинейной деформационной модели при действии ЦЗО // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2 (85). С. 57–67.

24. 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. Rzhantsyn A. R. *Teoriya rascheta stroitel'nykh konstruktсий na nadezhnost'* [Theory of calculation of building structures for reliability]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978, 239 p.

2. Augusti G., Baratta A., Kashiati F. *Veroyatnostnye metody v stroitel'nom proektirovanii* [Probabilistic methods in construction design]. Trans. from English by Yu. D. Sukhov. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988.

3. Bolotin V. V. *Primenenie metodov teorii veroyatnostey i teorii nadezhnosti v raschetakh sooruzheniy* [Application of methods of probability theory and reliability theory in calculations of structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988, 255 p.
4. Rayzer V. D. *Veroyatnostnye metody v analize nadezhnosti i zhivuchesti sooruzheniy* [Probabilistic methods in the analysis of reliability and survivability of structures]. Moscow, ASV Publ., 2018, 396 p.
5. Potekhin I. A. *Analiz napryazhyonnogo sostoyaniya arki pri dvumernom sluchayno-neodnorodnom raspredelenii modulya uprugosti materiala* [Analysis of the arch stress state at two-dimensional random heterogeneous distribution of the material elastic modulus]. *Trudy 74-y Vserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the 74-th All-Russian (National) Scientific and Practical Conference]. Karavaevo, 2023, pp. 120–125.
6. Potekhin I. A. *Analiz deformatsiy v sluchayno-neodnorodnom tsilindre* [Analysis of deformations in a randomly heterogeneous cylinder]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i khimicheskie tekhnologii – Bulletin of Tver State Technical University. Series: Construction. Electrical and Chemical Engineering*, 2019, no. 2 (2), pp. 25–29.
7. Pshenichkina V. A., Sukhina K. N., Dubovskiy M. E., Glukhov A. V. *Otsenka nadezhnosti monolitnoy zhelezobetonnoy plity perekrytiya pri vvode zdaniya v ekspluatatsiyu* [Evaluation of reliability of cast-in-situ reinforced concrete slab during building commissioning]. *Vestnik Volgogradskogo sudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura – Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*, 2023, iss. 1 (90), pp. 54–62.
8. Pinus B. I. *Obespechenie dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruksiy pri nizkotemperaturnykh vozdeystviyakh. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Ensuring durability of reinforced concrete structures under low-temperature impacts. Dr. Sci. Tech. diss.]. Irkutsk, 1986, 495 p.
9. Pinus B. I., Pinus Zh. N., Khomyakova I. V. *Izmenenie konstruktivnykh svoystv betonov pri okhlazhdenii i zamorazhivanii* [Changing the structural properties of concretes during cooling and freezing]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2015, no. 2 (97), pp. 111–116.
10. Pinus B. I., Korneeva I. G., Kalashnikov M. P. *Statisticheskie zakonomernosti izmeneniya parametrov vnutrennego soprotivleniya tsementnykh kompozitov pri zamorazhivanii i ottaivanii* [Statistic patterns of changes in the internal resistance parameters of cement composites during freezing and thawing]. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' – News of higher schools. Investments. Construction. Real estate*, 2022, vol. 12, no. 2 (41), pp. 206–213. DOI: 10.21285/2227-2917-2022-2-206-213.
11. Duan A., Jin W. L., Qian J., W. Qian. Effect of freeze-thaw cycles on the stress-strain curves of unconfined and confined concrete. *Mater Struct.* 2011, vol. 44 (7), pp. 1309–1324. DOI:10.1617/s11527-010-9702-9
12. Guan Xiao, Chenghua Zhang. Stress-strain behaviour and acoustic emission characteristic of gangue concrete under axial compression in frost environment. *Construction and Building Materials*, 2019, 30 September, vol. 220, pp. 476–488. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.008>
13. Hanjari K. Z. Experimental study of the material and bond properties of frost-damaged concrete. *Cem Concr Res.*, 2011, vol. 41 (3), pp. 244–254.
14. Xiaolin Yang, Genhui Wang, Hongzhao Li, Jiang Fan. Numerical simulation of static stress-strain relationship and failure mode for freeze-thaw concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2020, vol. 2020. Article ID 1921598, 9 p. Available at: <https://doi.org/10.1155/2020/1921598>
15. Xiaolin Yang, Genhui Wang, Shiwu Gao, Min Song, Anqi Wang. Equation for the degradation of uniaxial compression stress of concrete due to freeze-thaw damage. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 2019. Article ID 8603065, 8 p. Available at: <https://doi.org/10.1155/2019/8603065>
16. Hasan M., Okuyama H., Sato Y., Ueda T. Stress-strain model of concrete damaged by freezing and thawing cycles. *J AdvConcr Technol.* 2004, vol. 2 (1), pp. 89–99.
17. Sun Ming, Xin Dabo, Zou Chaoying. Damage evolution and plasticity development of concrete materials subjected to freeze-thaw during the load process. *Mechanics of Materials*, 2019, December, vol. 139. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103192>
18. Xuhui Zhang, Lei Wang, Jianren Zhang. Mechanical behavior and chloride penetration of high strength concrete under freeze-thaw attack. *Cold Regions. Science and Technology.* 2017, October, vol. 142, pp. 17–24. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.07.004>
19. Istomin A. D., Petrova V. A. *Ostatochnye deformatsii betona zhelezobetonnykh elementov pri tsiklicheskom zamorazhivanii i ottaivanii* [Residual deformations of concrete of reinforced concrete elements during cyclic freezing and thawing]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya – Construction and reconstruction*, 2022, no. 3, pp. 23–31. Available at: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-101-3-23-31>

20. Popov V. M., Plyusnin M. G. *Ekspperimental'noe issledovanie diagramm σ - ϵ betona pri odnoosnom szhatii i vliyaniya na ikh formu TsZO* [Experimental study of σ diagrams-concrete ϵ under uniaxial compression and the influence on their shape of the SCR]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 4 (81), pp. 80–88.

21. Popov V. M., Unzhakov S. N. *Rabota izgibaemykh zhelezobetonnykh konstruktsiy v usloviyakh znakoperemennykh temperatur* [Performance of bent reinforced concrete structures under alternating temperature conditions]. *Vestnik TI(f) YaGU – Bulletin of TI (f) YAGU*, 2004, pp. 39–43.

22. Popov V. M., Chernykh I. V., Pinus B. I. *Vliyanie zamorazhivaniya na nesushchuyu sposobnost' izgibaemogo zhelezobetonного elementa* [Freezing effect on bearing capacity of bent reinforced concrete element]. *Trudy4-y Mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh i studentov «Aktual'nye problemy sovremennoy nauki. Tekhnicheskie nauki. Chasti 18–20. Arkhitektura. Stroitel'stvo. Transport»* [Proceedings of the 4-th

International conference of young scientists and students “Current problems of modern science. Technical sciences. Parts 18-20. Architecture. Construction. Transport”]. Samara, 2003, pp. 56–58.

23. 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 TsZO* [Assessment of the provision of the results of calculations of bearing capacity on the normal cross-section of eccentrically compressed reinforced concrete elements using a nonlinear deformation model under the action of the RECO]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2021, no. 2 (85), pp. 57–67.

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