

Влияние изменчивости деформационных характеристик бетона на обеспеченность несущей способности изгибаемых железобетонных элементов в условиях низких температур

В.М. Попов, О.А. Яцковец

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация: Железобетонные конструкции (ЖБК), эксплуатирующие в естественных условиях Крайнего Севера, подвергаются попеременному замораживанию и оттаиванию. Воздействие циклов замораживания и оттаивания (ЦЗО) приводит к деградации не только прочностных, но и деформационных свойств (ДС) бетона. В действующих нормах проектирования ЖБК ДС бетона и арматуры назначены как среднестатистические величины. В данной работе исследуется влияние изменчивости ДС бетона на обеспеченность несущей способности изгибаемых железобетонных элементов до и после ЦЗО.

Ключевые слова: циклы замораживания и оттаивания, статистическая закономерность сопротивления, изгиб, железобетон, предельная деформация бетона, обеспеченность несущей способности, изменчивость деформационных свойств бетона

Введение

Железобетонные конструкции, эксплуатирующийся в естественных условиях Крайнего Севера подвергаются воздействию знакопеременных температур. В работах [1,2] описаны вопросы влияния низких температур на прочностные и деформационные свойства бетона. Влияние технологических факторов на морозостойкость монолитных железобетонных конструкций исследовано в [3-5]. В работах [6-8] рассмотрены различные аспекты надежности железобетонных конструкций в условиях переменного замораживания и оттаивания. Переменное замораживание и оттаивание бетона в конструкциях изменяет его прочностные и деформационные свойства, происходит трансформация диаграмм деформирования бетона. В нормах проектирования железобетонных конструкций СП 63.13330.2018 значения деформаций бетона ϵ_{b0} при расчетах по I и II группам предельных состояний приняты равным средним значениям $\epsilon_{b0} = 0,002$. Уменьшение расчетных значения деформаций бетона ϵ_{b0} и ϵ_{b2} мало влияет на значения

несущей способности изгибаемых железобетонных конструкций при обычных коэффициентах армирования. Однако при коэффициентах армирования близким или превышающих значения предельных (μ_R), при которых разрушение начинается с дробления сжатой зоны бетона и носит хрупкий характер, влияние значения деформаций на несущую способность изгибаемых железобетонных элементов существенно возрастает. Попеременное замораживание и оттаивание бетона не только снижает его прочность, но и изменяет его деформационные свойства. В работе исследуется влияние изменения прочности и деформационных свойств бетона после воздействия циклов замораживания и оттаивания (ЦЗО) на несущую способность изгибаемых элементов железобетонных конструкций. Рассматриваются вопросы влияния изменчивости прочностных и деформационных свойств бетона, в том числе в условиях знакопеременных температур, на величину обеспеченности несущей способности изгибаемых элементов железобетонных конструкций.

Цель и методика исследования

Цель работы - оценка влияния изменчивости деформационных характеристик бетона на статистические закономерности сопротивления изгибаемых железобетонных элементов в условиях знакопеременных температур.

Методология настоящей работы заключается в применении методов теории вероятности и математической статистики и использовании нелинейной деформационной модели для численного моделирования напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов железобетонных конструкций.

Описание исследования

В качестве исходных данных для анализа несущей способности изгибаемых железобетонных элементов используются 5000 диаграмм

деформирования бетона и арматурной стали, полученные из результатов экспериментальных исследований при помощи методов математической статистики [9].

Для определения влияния изменчивости деформационных свойств и призмной прочности бетона были выполнены расчеты несущей способности изгибаемых железобетонных элементов сечением $h \times b = 400 \times 200$ мм с различными коэффициентами армирования. Расчет выполнялся диаграммным методом по разработанной авторами программе. В качестве диаграмм деформирования бетона использовались трехлинейные диаграммы деформирования бетона по СП 63.13330.2018 и диаграммы Саржина.

В данной работе определялись распределения следующих величин: средние, нормативные и расчетные значения несущей способности изгибаемых железобетонных элементов с различными коэффициентами армирования.

Были выполнены расчеты несущей способности изгибаемых железобетонных элементов с использованием 5000 диаграмм деформирования бетона до и 5000 диаграмм деформирования бетона до и после воздействия ЦЗО с учетом и без учета изменчивости деформационных характеристик бетона и 5000 диаграмм деформирования арматуры класса А500.

Нормативные и расчетные значения несущей способности изгибаемых железобетонных элементов с различными коэффициентами армирования рассчитывались по формулам (1-2):

$$M_n = \overline{M} - 1,64 \cdot \sigma, \quad (1)$$

$$M_n = \overline{M} - 3 \cdot \sigma, \quad (2)$$

где $\overline{M}$ - среднее значение несущей способности, σ - среднее квадратичное отклонение случайной величины.

Коэффициент обеспеченности [10] $K_{об}$ – отношение значения изгибающего момента, полученного по вероятностному методу $M_u(вер)$, к значению изгибающего момента, полученному по СП 63 $M_u(СП63)$ определялся по формуле (3):

$$K_{об} = \frac{M_u(вер)}{M_u(СП63)}, \quad (3)$$

Данный коэффициент показывает, насколько величина, полученная по вероятностному методу, соответствует той же величине, но рассчитанной по СП 63.

Обеспеченность несущей способности изгибаемых элементов железобетонных конструкций с различными коэффициентами армирования при различных средовых воздействиях, рассчитанная по СП 63, определялась по формуле:

$$\text{Обеспеченность} = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(M_{u,СП63} - M_{u,сред})^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

Анализ результатов

В ходе исследования, были получены кривые плотности вероятности несущей способности до воздействия ЦЗО с использованием диаграммы Саржина с учетом и без учета изменчивости деформационных свойств (ДС) (рис.1), из которых видно, что при малых коэффициентах армирования влияние изменчивости ДС бетона и арматуры не оказывает практического влияния на кривые плотности распределения. При больших коэффициентах армирования учет изменчивости ДС оказывает заметное влияние на плотность распределения.

Сравнение кривых плотности распределения несущей способности изгибаемых железобетонных элементов при использовании трехлинейной диаграммы деформирования и диаграммы Саржина до ЦЗО после воздействия показывает, что они отличаются не значительно – рис.2 и рис.3.

Поэтому, в дальнейшем рассматриваются результаты расчетов несущей способности изгибаемых железобетонных элементов диаграммным методом с использованием трехлинейных диаграмм деформирования бетона.

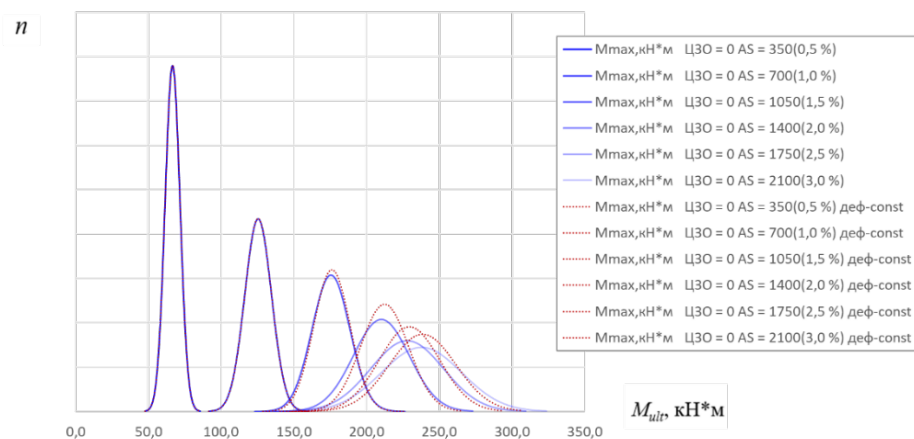


Рис. 1 – Кривые плотности распределения несущей способности изгибаемого элемента 200×400 мм до ЦЗО с использованием диаграммы Саржина с учетом и без учета изменчивости ДС

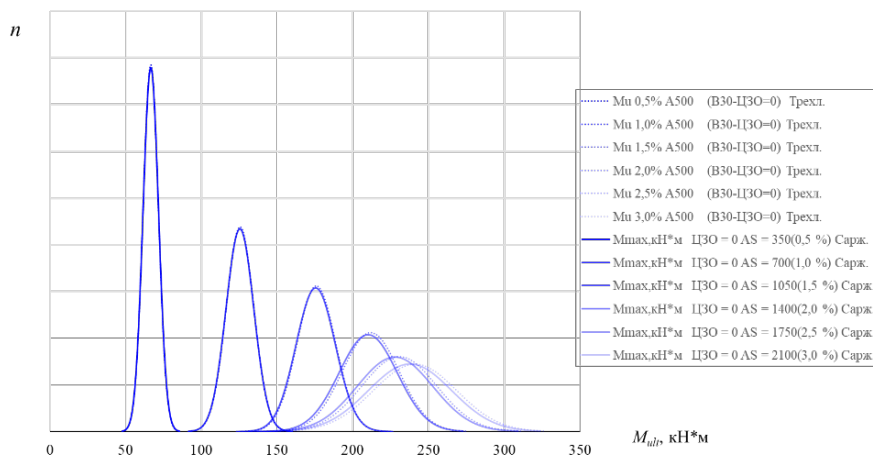


Рис. 2 – Кривые плотности распределения несущей способности изгибаемых железобетонных элементов 200×400 мм рассчитанных диаграммным методом с использованием трехлинейных диаграмм деформирования бетона и диаграмм Саржина до воздействия ЦЗО

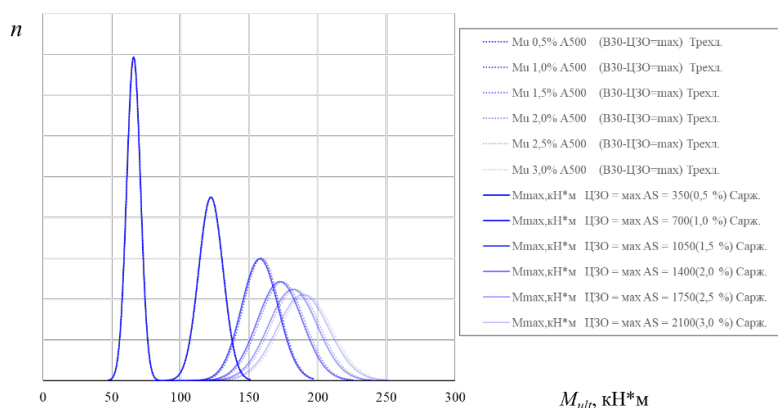


Рис. 3 – Кривые плотности распределения несущей способности изгибаемых железобетонных элементов 200×400 мм рассчитанных диаграммным методом с использованием трехлинейных диаграмм деформирования бетона и диаграмм Саржина после воздействия ЦЗО

Также, в ходе статистической обработки данных, были получены кривые плотности распределения несущей способности изгибаемого элемента 200×400 мм до и после ЦЗО (рис.4). В результате воздействия ЦЗО расчетное значение несущей способности, вычисленной диаграммным методом уменьшилась на 13% при коэффициенте армирования 1,5% и на 20% - при $\mu = 2 \%$.

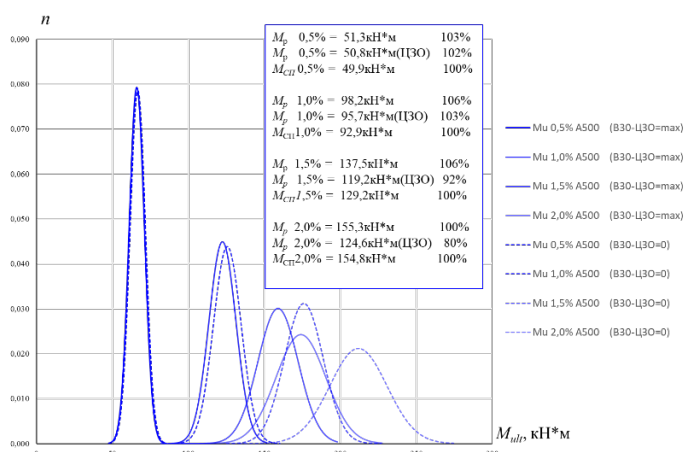


Рис. 4 – Кривые плотности распределения несущей способности изгибаемого элемента 200×400 мм до и после ЦЗО

Графики зависимости коэффициентов обеспеченности до и после ЦЗО для расчетных, нормативных и средних значений приведены на рис. 5 и в таблице 1. При малых коэффициентах армирования (до 1 % включительно) коэффициенты обеспеченности до ЦЗО и после ЦЗО отличаются незначительно. Максимальное различие коэффициентов обеспеченности до и после воздействия ЦЗО при коэффициенте армирования 2%.

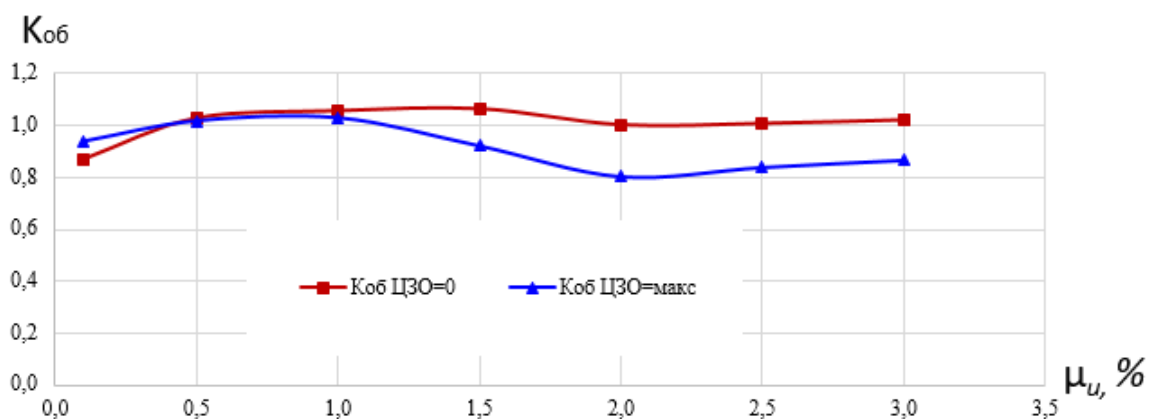


Рис. 5 – Кривые распределения коэффициентов обеспеченности

Таблица № 1

Значения коэффициентов обеспеченности расчетных значений несущей способности до и после ЦЗО по СП 63

μ_s	ЦЗО=0	ЦЗО=макс
0,1	0,872	0,941
0,5	1,029	1,018
1,0	1,057	1,029
1,5	1,064	0,922
2,0	1,003	0,805

Была построена кривая распределения расчетной обеспеченности до и после ЦЗО - рис.6 и таблице 2. После ЦЗО до $\mu = 2 \%$ обеспеченность снижается, а после – увеличивается. Это связано с тем, что по СП63 при больших процентах армирования, когда относительная высота сжатой зоны бетона больше граничной относительной высоты сжатой зоны бетона ($\xi > \xi_p$), несущая способность принимается постоянной.

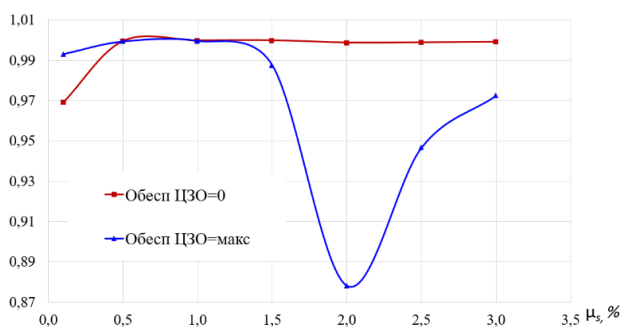


Рис. 6 – Зависимость обеспеченности несущей способности изгибаемых железобетонных от коэффициента армирования до и после воздействия ЦЗО с учетом изменчивости деформаций

Таблица № 2

Значения обеспеченности расчетных значений до и после воздействия циклов замораживания и оттаивания с учетом изменчивости деформаций

μ_s	ЦЗО=0	ЦЗО=макс
0,1	0,96915	0,99302
0,5	0,99946	0,99926
1,0	0,99983	0,99953
1,5	0,99987	0,98750
2,0	0,99876	0,87810

В ходе исследования были получены зависимости несущих способностей от процента армирования для средних (рис.7 и таблице 3), нормативных (рис.8 и таблице 4) и расчетных значений (рис.9 и таблице 5) до и после ЦЗО. Для средних значений при учете изменчивости деформаций без учета ЦЗО и при малом проценте армирования (до 1% включительно) в условиях знакопеременных температур не происходит значительное снижение несущей способности. При больших процентах армирования при ЦЗО несущая способность снижается до 19,2 % (при $\mu = 2$ %). Для всех величин до и после ЦЗО несущая способность с учетом изменчивости деформаций ниже, чем без учета изменчивости. При этом, при малых коэффициентах армирования (до 1%) во всех случаях учет изменчивости деформаций практически не влияет на значение несущей способности, а при

больших процентах армирования разница существенная, причем после ЦЗО эта разница увеличивается.

Для нормативных и расчетных значений при учете изменчивости деформаций наблюдается картина, аналогичная средним значениям: значительное снижение несущей способности происходит только при больших процентах армирования в условиях знакопеременных температур.

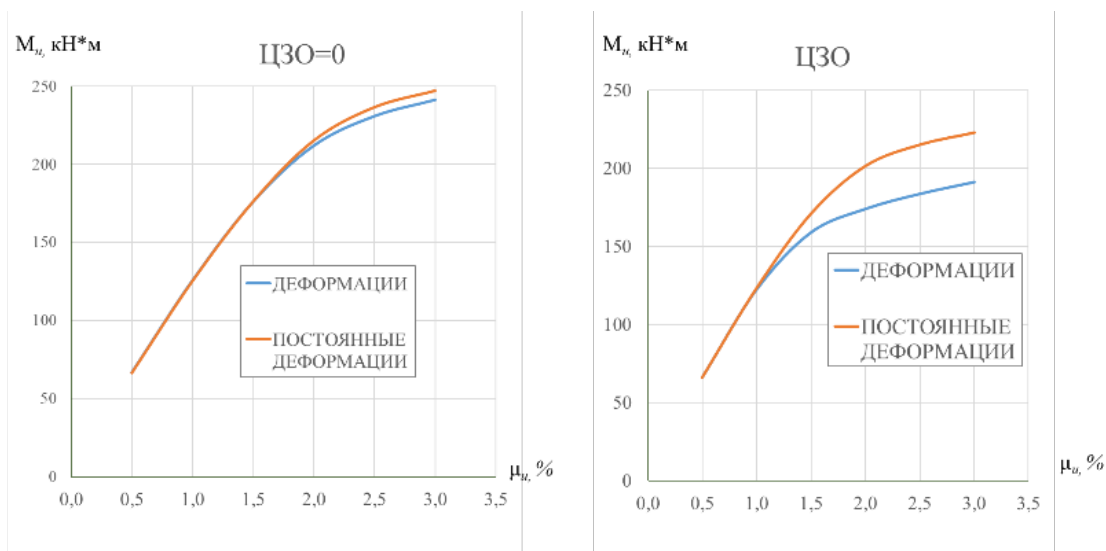


Рис. 7 – Зависимость средних значений несущей способности изгибаемых железобетонных элементов от процента армирования до и после ЦЗО с учетом и без учета изменчивости деформаций бетона и арматуры

Таблица № 3

Средние значения несущей способности изгибаемых железобетонных элементов (кН·м) при различных коэффициентах армирования до и после ЦЗО с учетом и без учета изменчивости деформаций

$\mu, \%$	С УЧЕТОМ ИЗМЕНЧИВОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ		БЕЗ УЧЕТА ИЗМЕНЧИВОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ	
	ЦЗО = 0	ЦЗО	ЦЗО = 0	ЦЗО
0,5	66,6 (100,2%)	65,9 (99,1%)	66,5 (100%)	66,1 (99,4%)
1,0	125,6 (100,2%)	122,3 (97,5%)	125,4 (100%)	123,4 (98,4%)
1,5	176,0 (99,8%)	158,9 (90,1%)	176,3 (100%)	171,1 (97,1%)
2,0	211,9 (98,4%)	174,0 (80,8%)	215,4 (100%)	201,6 (93,6%)

Примечание: за 100 % приняты результаты, полученные без учета влияния попеременного замораживания и оттаивания и без при деформациях бетона (ε_{b0} и ε_{b2}) по СП 63.13330.2018

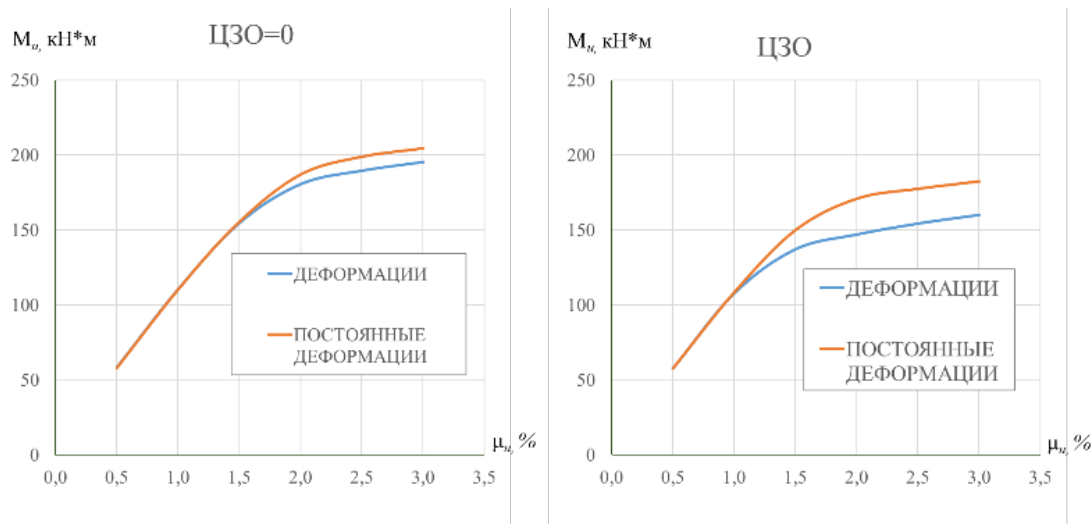


Рис. 8 – Зависимость нормативных значений несущей способности изгибаемых железобетонных элементов от процента армирования до и после ЦЗО с учетом и без учета изменчивости деформаций бетона и арматуры

Таблица № 4

Нормативные значения несущей способности изгибаемых железобетонных элементов (кН·м) при различных коэффициентах армирования до и после ЦЗО с учетом и без учета изменчивости деформаций

μ, %	С УЧЕТОМ ИЗМЕНЧИВОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ		БЕЗ УЧЕТА ИЗМЕНЧИВОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ	
	ЦЗО = 0	ЦЗО	ЦЗО = 0	ЦЗО
0,5	58,2 (100,2%)	57,6 (99,1%)	58,1 (100%)	57,8 (99,5%)
1,0	110,6 (100,2%)	107,8 (97,6%)	110,4 (100%)	108,6 (98,4%)
1,5	154,8 (99,5%)	137,2 (88,2%)	155,5 (100%)	150,1 (96,5%)
2,0	180,8 (96,6%)	147,0 (78,6%)	187,1 (100%)	171,1 (91,4%)

Примечание: за 100% приняты результаты, полученные без учета влияния попеременного замораживания и оттаивания и без при деформациях бетона (ε_{b0} и ε_{b2}) по СП 63.13330.2018

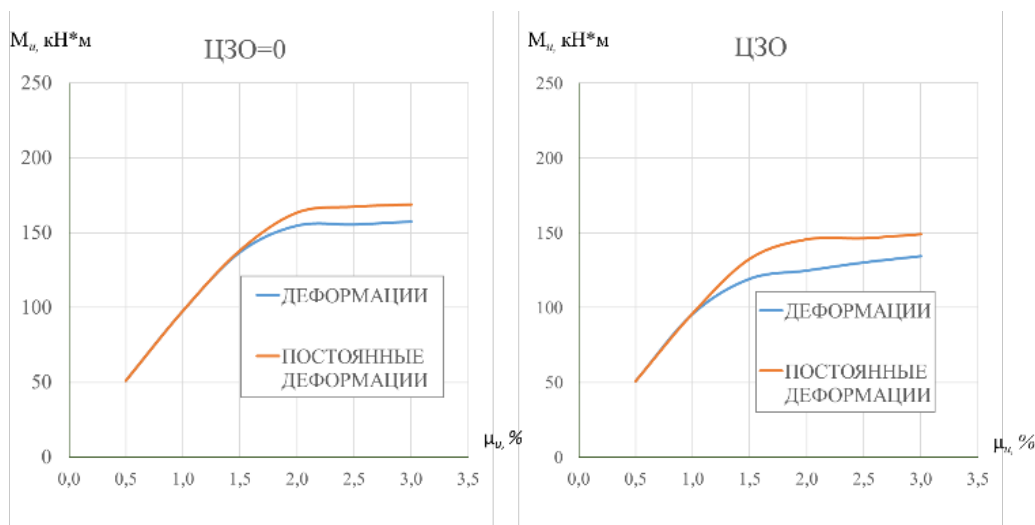


Рис. 9 – Зависимость расчетных значений несущей способности изгибаемых железобетонных элементов от процента армирования до и после ЦЗО с учетом и без учета изменчивости деформаций бетона и арматуры

Таблица № 5

Расчетные значения несущей способности изгибаемых железобетонных элементов (кН·м) при различных коэффициентах армирования до и после ЦЗО с учетом и без учета изменчивости деформаций

$\mu, \%$	С УЧЕТОМ ИЗМЕНЧИВОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ		БЕЗ УЧЕТА ИЗМЕНЧИВОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ	
	ЦЗО = 0	ЦЗО	ЦЗО = 0	ЦЗО
0,5	51,2 (100,0%)	50,9 (99,4%)	51,2 (100%)	50,8 (99,2%)
1,0	98,0 (100,1%)	95,7 (97,8%)	97,9 (100%)	98,3 (100,4%)
1,5	137,2 (99,2%)	119,1 (86,1%)	138,3 (100%)	132,7 (96,0%)
2,0	155,0 (94,7%)	124,6 (76,2%)	163,6 (100%)	145,8 (89,1%)

Примечание: за 100% приняты результаты, полученные без учета влияния попеременного замораживания и оттаивания и без при деформациях бетона (ε_{b0} и ε_{b2}) по СП 63.13330.2018

Таким образом, учет изменчивости деформационных характеристик бетона при расчете изгибаемых железобетонных элементов, подверженным ЦЗО при $\mu = 2 \%$ снижает расчетное значение несущей способности на 14,6 %.

Исходя из вышеперечисленного, были даны следующие рекомендации по проектированию изгибаемых железобетонных элементов в условиях знакопеременных температур:

- В условиях знакопеременных температур рекомендуется стремиться к проектированию изгибаемых железобетонных элементов с небольшим коэффициентом армирования, т.к. чем больше коэффициент армирования, тем больше снижается несущая способность и ее обеспеченность под влиянием ЦЗО;
- При проектировании изгибаемых железобетонных элементов в условиях знакопеременных температур с коэффициентом армирования больше 1% рекомендуется в расчетах учитывать изменчивость деформационных характеристик бетона.

Выводы

- Вид диаграммы деформирования бетона незначительно влияет на статистическое распределение несущей способности изгибаемых железобетонных элементов в условиях знакопеременных температур;
 - При коэффициенте армирования до 1 % включительно воздействие ЦЗО не оказывает существенного влияния на несущую способность изгибаемых железобетонных элементов. При коэффициентах армирования близких к предельным (μ_R) учет знакопеременных температур приводит к значительному уменьшению несущей способности изгибаемых железобетонных элементов по сравнению с нормами;
 - При отсутствии ЦЗО при любом проценте армирования и при воздействии ЦЗО при коэффициентах армирования до 1,5 % обеспеченность несущей способности изгибаемых железобетонных элементов не ниже требуемых значений. При воздействии ЦЗО при коэффициентах армирования близких к предельным обеспеченность несущей способности изгибаемых железобетонных элементов становится ниже требуемой;
-

- Учет изменчивости деформационных характеристик бетона при коэффициентах армирования до 1 % в условиях воздействия знакопеременных температур практически не влияет на значение несущей способности, а при коэффициентах армирования близких к предельным приводит к ее снижению;

- Были даны рекомендации по проектированию изгибаемых железобетонных элементов в условиях знакопеременных температур.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта СПбГАСУ на 2025 год

Литература

1. Huo Y., Sun H., Lu D., Chen Z., Yingzi Y. Mechanical properties of concrete at low and ultra-low temperatures – a review // Journal of Infrastructure Preservation and Resilience. 2022. V. 3, № 1. P. 20.

2. Li X, Qin L, Guo L, Li Y. Research on the mechanical properties of concrete under low temperatures // Materials. 2024. V. 17, № 8. P. 1882.

3. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Сухин Д.П. О влиянии условий выдерживания при возведении массивных монолитных железобетонных конструкций на прочность бетона // Инженерный вестник Дона, 2021. №10 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/2021/7228.

4. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Чепуренко А.С., Сухин Д.П. О влиянии некоторых технологических факторов на качество монолитных железобетонных конструкций // Инженерный вестник Дона. 2021. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7256.

5. Несветаев Г.В., Догова А.В., Постой Л.В. К вопросу оценки морозостойкости бетонов по критерию прочности // Инженерный вестник Дона. 2019. № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N7y2019/6106.

6. Пинус Б.И. Концепция системного подхода к обеспечению надежности сооружений по ресурсу морозостойкости // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023. № 6(774). С.101-109.

7. Пинус Б.И., Калашников М.П. К обоснованию коррекции расчетных моделей железобетонных конструкций при низкотемпературных воздействиях // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023. № 1(769). С. 17-23.

8. Истомин А.Д., Петрова В.А. Напряженно-деформированное состояние статически неопределимых балок в условиях отрицательных температур // Строительство и реконструкция. 2019. № 1(81). С. 3-9.

9. Попов В.М., Пинус Б.И., Плюсин М.Г., Кондратьева Л.Н. Влияние изменчивости деформационных характеристик бетона на надежность сжатых железобетонных конструкций // Жилищное строительство. 2025. № 1-2. С. 91-95.

10. Исайкин А.Я. Оценка надежности статически неопределимых железобетонных конструкций на основе метода предельного равновесия. Дис. ... д-ра техн. наук. 05.23.01. М. 2000. 405 с.

References

1. Huo Y., Sun H., Lu D., Chen Z., Yingzi Y. Journal of Infrastructure Preservation and Resilience. 2022. V. 3, № 1. P. 20.

2. Li X, Qin L, Guo L, Li Y. Materials. 2024. V. 17, № 8. P. 1882.

3. Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I., Suxin D.P. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021. №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/2021/7228

4. Nesvetaev G.V., Koryanova Y.I., Chepurnenko A.S., Sukhin D.P. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7256.

5. Nesvetaev G.V., Dolgova A.V., Postoy L.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N7y2019/6106.



6. Pinus B.I. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo. 2023. № 6(774). Pp. 101-109.
7. Pinus B.I., Kalashnikov M.P. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo. 2023. № 1(769). Pp. 17-23.
8. Istomin A.D., Petrova V.A. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2019. № 1(81). Pp. 3-9.
9. Popov V.M., Pinus B.I., Plyusnin M.G., Kondratyeva L.N. Zhilishchnoye stroitel'stvo. 2025. № 1-2. Pp. 91-95.
10. Isaikin A.YA. Otsenka nadezhnosti staticheski neopredelimyykh zhelezobetonnykh konstruktsiy na osnove metoda predel'nogo ravnovesiya [Assessment of the reliability of statically indeterminate reinforced concrete structures based on the limit equilibrium method]. Dis. ... d-ra tekhn. nauk. 05.23.01. M. 2000. 405 p.

Дата поступления: 11.09.2025

Дата публикации: 25.10.2025