

УДК 624.071

© В. М. Попов, канд. техн. наук, доцент

© В. В. Белов, д-р техн. наук, доцент

(АО «Атомэнергопроект»,

Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: vvbelov@atomproekt.com

© О. А. Яцковец, студент

(Санкт-Петербургский государственный

архитектурно-строительный университет,

Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: popov_vladimir_m@mail.ru, yaczkovecz@bk.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-1-29-43

© V. M. Popov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© V. V. Belov, Dr. Sci. Tech., Associate Professor

(JSC «Atomenergoproekt»,

St. Petersburg, Russia)

E-mail: vvbelov@atomproekt.com

© O. A. Yatskovets, student

(Saint Petersburg State University

of Architecture and Civil Engineering,

St. Petersburg, Russia)

E-mail: popov_vladimir_m@mail.ru, yaczkovecz@bk.ru

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

THE INFLUENCE OF THE VARIABILITY OF CONCRETE DEFORMATION CHARACTERISTICS ON THE LOAD-BEARING CAPACITY OF ECCENTRICALLY COMPRESSED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER ALTERNATING TEMPERATURE EFFECTS

В результате воздействия знакопеременных температур происходит деградация бетона: уменьшаются его прочность и предельные относительные деформации при осевом сжатии ϵ_{b0} . В нормах проектирования приняты средние значения ϵ_{b0} , что не позволяет оценить уровень надежности несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов. Воздействие попеременного замораживания и оттаивания бетона снижает уровень обеспеченности несущей способности. Выполнена оценка влияния изменчивости прочностных и деформационных характеристик бетона в условиях воздействия знакопеременных температур на несущую способность сжатых железобетонных элементов с использованием методов математической статистики и диаграммного метода расчета таких элементов.

Ключевые слова: циклы замораживания и оттаивания, внецентренно сжатый железобетонный элемент, деформационные характеристики бетона.

As a result of exposure to alternating temperatures, there occurs concrete degradation. Its strength and limiting relative deformations are reduced under axial compression ϵ_{b0} . In the design standards ϵ_{b0} is accepted as average values, which does not allow assessing the level of reliability of the bearing capacity of eccentrically compressed reinforced concrete elements. The effects of alternating freezing and thawing of concrete will reduce the level of load-bearing capacity. Using the methods of mathematical statistics and diagrammatic calculation for compressed reinforced concrete elements, there has been made an assessment of the effect of variability in the strength and deformation characteristics of concrete under the influence of alternating temperatures on their bearing capacity.

Keywords: cycles of freezing and thawing, eccentrically compressed reinforced concrete element, deformation characteristics of concrete.

Введение

В нормах проектирования железобетонных конструкций значения предельных относительных деформаций бетона приняты как средние значения ϵ_{b0} , равные 2 ‰. Расчетное сопротивление арматуры сжатию назначено с учетом совместной работы сжатой арматуры и окружающего бетона. Поэтому обеспеченность расчетных сопротивлений арматуры класса А500 и более высоких ниже, чем для бетона при сжатии и арматуры при растяжении, назначенных с учетом их изменчивости. В разрешающих уравнениях метода расчета по предельным усилиям предельные деформации бетона при сжатии ϵ_{b0} используются косвенно, через назначение расчетного сопротивления арматуры сжатию: при кратковременном действии нагрузки принимаются значения $R_{sc} \leq 400$ МПа. Для определения характера разрушения железобетонных конструкций по нормальному сечению при расчете граничной относительной высоты сжатой зоны бетона используются предельные деформации бетона ϵ_{b2} . В нелинейной деформационной модели [1–3] в зависимости от значения деформаций определяются напряжения в арматуре и бетоне на основе диаграмм их деформирования. Предельные деформации бетона ϵ_{b0} приняты с уровнем обеспеченности 0,5, а расчетное значение деформаций бетона при сжатии — 0,9986. Неопределенной остается обеспеченность расчетного сопротивления арматуры сжатию.

Предельные деформации бетона ϵ_{b0} , начальный модуль упругости и пиковые напряжения уменьшаются из-за трансформации диаграмм деформирования бетона при воздействии циклов замораживания и оттаивания (ЦЗО) [4–6]. Важность учета трансформации диаграмм деформирования при ЦЗО отмечается не только отечественными, но и зарубежными авторами [7–9]. В [10–12] в рамках метода расчета по предельным усилиям предложен вариант методики расчета

внецентренно сжатых железобетонных элементов. Влияние ЦЗО приводит к снижению модуля упругости бетона, что влечет за собой снижение несущей способности при малом проценте армирования и большой расчетной длине (для элементов большой гибкости) [13–14]. При кратковременных нагрузках и влиянии ЦЗО необходимо учесть снижение начального модуля упругости бетона в диаграммном методе расчета [15]. Влияние попеременного замораживания и оттаивания минимально при малых коэффициентах армирования и больших эксцентриситетах при внецентренном сжатии [16–17]. Оно возрастает с увеличением количества арматуры и уменьшением эксцентриситета продольной силы. Негативное влияние ЦЗО на прочностные и деформационные свойства бетона также отмечается в работах [18–19]. Для внецентренно сжатых элементов определяющим фактором снижения несущей способности после воздействия циклов замораживания и оттаивания, наряду с уменьшением прочности бетона, является изменчивость деформационных характеристик бетона [20]. Именно анализ влияния изменения этих свойств и положен в основу настоящего исследования.

Методы

Основной задачей работы является анализ изменения несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов при варьировании деформационных параметров бетона и арматуры, обусловленном действием знакопеременных температур.

Методологией настоящей работы является совмещение статистической обработки данных с расчетным анализом работы внецентренно сжатых железобетонных элементов, выполненным с использованием диаграммного подхода и авторского программного комплекса SIGA 61 [22].

Для анализа несущей способности железобетонных внецентренно сжатых элементов взяты 5000 диаграмм деформирования

до и после воздействия ЦЗО арматурной стали и бетона, полученные методами математической статистики на основе экспериментальных результатов [13].

Была принята арматура класса А500, класс бетона В30, сечения с различными коэффициентами армирования и габаритами $h \times b = 400 \times 400$ мм. Расчет выполнялся в разработанной авторами программе SIGA 61, основой которой является диаграммный метод. Были выбраны криволинейные диаграммы деформирования бетона Саржина. Полученные в ходе статистической обработки кривые плотности распределения вероятности призмной прочности бетона класса В30 представлены на рис. 1. В табл. 1 приведены коэффициент вариации V , расчетные R_b , нормативные R_{bn}

(по СП 63.13330.2018¹, далее по тексту СП 63) и средние R_b значения прочности бетона класса В30 до и после ЦЗО. После воздействия циклов замораживания и оттаивания происходит смещение кривой распределения влево, что говорит об уменьшении значений призмной прочности. При этом расчетное значение прочности после ЦЗО уменьшилось на 14,4 %.

Средние, нормативные и расчетные значения призмной прочности бетона до и после воздействия ЦЗО определялись по формулам:

$$\bar{R}_b = \frac{\sum_{i=1}^n R_{bi}}{n}; \quad (1)$$

¹ СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554403082?ysclid=mhu5ne05ax92510137>

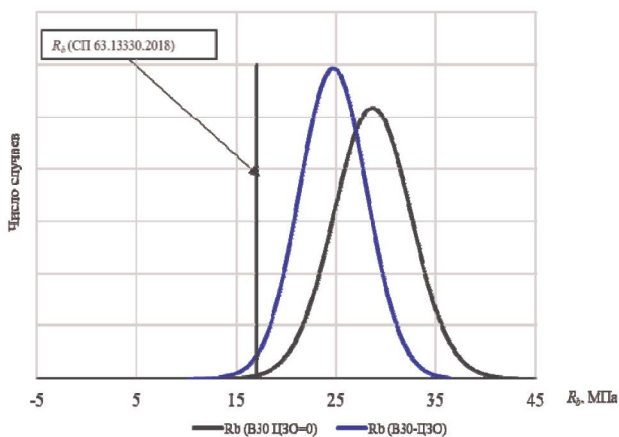


Рис. 1. Кривые плотности распределения вероятности призмной прочности бетона класса В30 до и после воздействия ЦЗО

Таблица 1
Статистические характеристики прочности R_b бетона класса В30 до и после ЦЗО

Параметры	ЦЗО = 0	После ЦЗО
\bar{R}_b , МПа	28,62	24,70
V , %	13,46	13,61
$R_{b,n}$, МПа	22,30	19,18
R_b , МПа	17,06	14,61
R_b , МПа (СП 63)	17,00	–

Таблица 2
Статистические характеристики модуля упругости E_b бетона класса В30 до и после ЦЗО

Параметры	ЦЗО = 0	После ЦЗО
\bar{E}_b , МПа	29 820	23 550
V , %	8,85	16,21
$E_{b,n}$, МПа	25 490	17 290
E_b , МПа	21 900	12 100
E_b , МПа (СП 63)	32 500	–

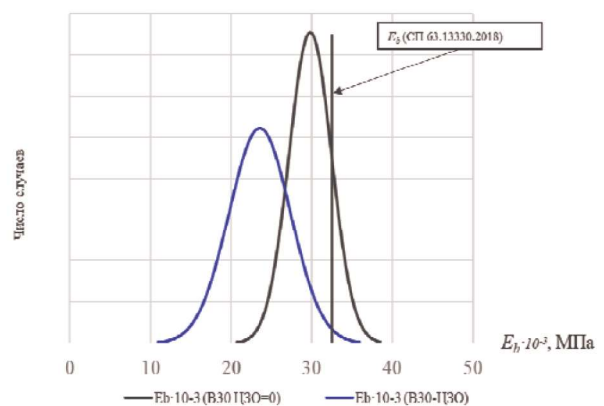


Рис. 2. Кривые плотности распределения вероятности модуля упругости бетона класса В30 до и после воздействия ЦЗО

$$V = \frac{\sigma}{R_b}; \quad (2)$$

$$R_{b,n} = (1 - 1,64V)\bar{R}_b; \quad (3)$$

$$R_b = (1 - 3,00 \cdot V)\bar{R}_b. \quad (4)$$

Значения и кривые плотности распределения вероятности модуля упругости E_b бетона класса В30 представлены в табл. 2 и на рис. 2.

Кривые плотности распределения вероятности и расчетные, нормативные и средние значения предельной деформации бетона ϵ_{b0} класса В30 представлены в табл. 3 и на рис. 3 соответственно.

Принятая в СП 63 величина ϵ_{b0} соответствует средним значениям. Воздействия ЦЗО снижают средние значения ϵ_{b0} , но расчетные величины до и после воздействия ЦЗО практически одинаковы.

Расчетное сопротивление арматуры сжатую, принятое в нормах проектирования,

назначено из условия совместной работы сжатой арматуры и сжатого бетона:

$$R_{sc} \leq E_s \cdot \epsilon_{b0}. \quad (5)$$

Средние, нормативные и расчетные значения расчетного сопротивления арматуры сжатию до и после воздействия ЦЗО приведены в табл. 4 и определялись по формулам

$$R_{sc,i} = E_{s,i} \cdot \epsilon_{b0,i}; \quad (6)$$

$$\bar{R}_{sc} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{sc,i}}{n}; \quad (7)$$

$$V = \frac{\sigma}{\bar{R}_{sc}}, \%; \quad (8)$$

$$R_{sc,n} = (1 - 1,64 \cdot V)\bar{R}_{sc}; \quad (9)$$

$$R_{sc} = (1 - 3,00 \cdot V)\bar{R}_{sc}. \quad (10)$$

Кривые плотности распределения вероятности сопротивления арматуры класса А500 сжатию показаны на рис. 4. Назначенное

Таблица 3

Статистические характеристики предельной деформации бетона ϵ_{b0} класса В30 до и после ЦЗО

Параметры	ЦЗО = 0	После ЦЗО
$\bar{\epsilon}_{b0}, \%$	2,00	1,72
$V, \%$	11,0	7,1
$\epsilon_{b,n}, \%$	1,63	1,52
$\epsilon_b, \%$	1,34	1,35
$\epsilon_b, \%$ (СП 63)	2,00	–

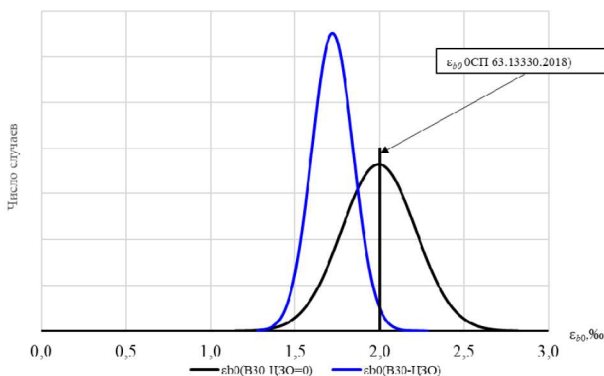


Рис. 3. Кривые плотности распределения вероятности предельной деформации бетона ϵ_{b0} класса В30 до и после воздействия ЦЗО

Таблица 4
Статистические характеристики сопротивления арматуры R_{sc} класса А500 сжатию до и после ЦЗО

Параметры	ЦЗО = 0	После ЦЗО
$\bar{R}_{sc}, \text{МПа}$	398,7	344,6
$\sigma, \text{МПа}$	54,16	37,00
$V, \%$	13,58	10,74
$R_{sc,n}, \text{МПа}$	309,9	283,9
$R_{sc}, \text{МПа}$	236,2	233,9
$R_{sc}, \text{МПа}$ (СП 63)	400	–

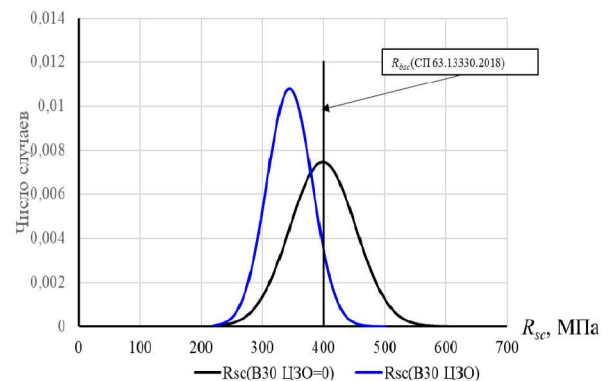


Рис. 4. Кривые плотности распределения вероятности расчетного сопротивления арматуры класса А500 сжатию до и после воздействия ЦЗО

в нормах проектирования железобетонных конструкций расчетное сопротивление арматуры класса А500 сжатию соответствует средним значениям (см. табл. 4). Коэффициент обеспеченности расчетного сопротивления арматуры сжатию предложен в [21] и определялся по формуле

$$K_{об}(R_{sc}) = \frac{R_{sc}}{R_{sc}(СП63)}, \quad (11)$$

до воздействия ЦЗО равен 0,591, а после — 0,584.

Таким образом, обеспеченность расчетного сопротивления арматуры класса А500 сжатию, определенная по формуле

$$\begin{aligned} \text{Обеспеченность } R_{sc} = \\ = 0,5 + \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{\bar{R}_{sc}}^{R_{sc}СП63} e^{-\frac{(R_{sc}СП63 - \bar{R}_{sc})^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (12) \end{aligned}$$

до воздействия ЦЗО составила 0,49, а после — всего 0,067.

В рамках расчетного анализа рассмотрена работа железобетонных элементов при внецентренном сжатии с различным уровнем армирования после воздействия ЦЗО. На основе статистического моделирования получены распределения предельной несущей способности, по которым определены средние, нормативные и расчетные показатели.

Расчетное моделирование основано на серии из 5000 реализаций диаграмм «напряжение–деформация» для бетона, рассматриваемых как при фиксируемых, так и при случайно варьируемых деформационных параметрах, а также на эквивалентном наборе диаграмм для арматуры класса А500.

Нормативные (M_n) и расчетные (M) значения несущей способности элементов при внецентренном сжатии для различных коэффициентов армирования определялись по следующим зависимостям:

$$M_n = \bar{M} - 1,64 \cdot \sigma, \quad (13)$$

$$M = \bar{M} - 3,00 \cdot \sigma, \quad (14)$$

где \bar{M} — среднее значение несущей способности; σ — среднее квадратичное отклонение случайной величины.

Результаты

В ходе исследования построены графики несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов, подвергнутых ЦЗО, с различными значениями коэффициентов армирования с учетом и без учета изменчивости предельных деформаций бетона ϵ_{b0} . При расчете внецентренно сжатых железобетонных элементов без учета изменчивости предельных деформаций ее значение принималось по СП 63 $\epsilon_{b0} = 2\text{‰}$. Каждая кривая ограничивает область значений N – M для определенного коэффициента армирования, не ведущих к разрушению внецентренно сжатого железобетонного элемента (область ниже кривой), где N — продольная сила, M — изгибающий момент. Анализ выполнялся в диапазоне продольных усилий от $N = 0$, характеризующего чистый изгиб, до предельного значения N_{max} , соответствующего центральному сжатию при отсутствии изгибающего момента ($M = 0$).

Для средних значений несущей способности после воздействия ЦЗО без учета изменчивости деформаций при коэффициенте армирования 1,5 % и ниже кривая N – M имеет параболический вид: от нулевого момента до некоторого критического значения изгибающий момент увеличивается, продольная сила падает, а при переходе через эту точку одновременно уменьшаются и изгибающий момент, и продольная сила (рис. 5, а). Это связано с тем, что происходит переход растянутой арматуры в сжатое состояние и уменьшение в ней напряжения. При коэффициенте армирования больше 1,5 % кривая ближе к ломаной прямой без параболического заворота, так как арматура не успевает перейти в сжатое состояние при большом коэффициенте армирования.

Учет вариабельности деформационных параметров приводит к изменению характера зависимости для средних значений: параболический вид сохраняется лишь при уровне армирования 1 % (рис. 5, б). Для всех

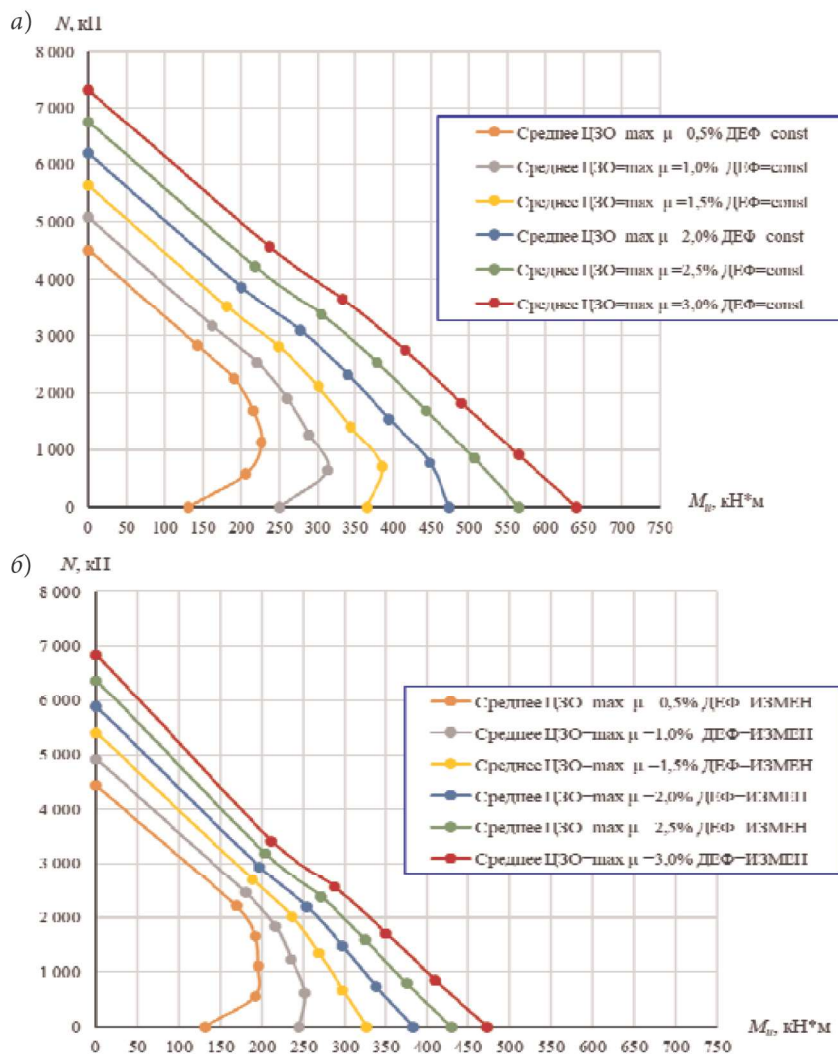


Рис. 5. Средние значения несущей способности после воздействия ЦЗО:
 а — без учета изменчивости деформаций (деформации приняты по СП 63.13330.2018)
 прямоугольных внецентренно сжатых элементов с симметричной арматурой;
 б — с учетом изменчивости деформаций

рассмотренных схем армирования отмечается сокращение интегральной площади соответствующих графиков. Анализ результатов свидетельствует о смещении границы предельной работы внецентренно сжатых железобетонных элементов в сторону меньших усилий (то есть снижении несущей способности) при учете вариации деформационных характеристик после ЦЗО.

На рис. 6, а и б, в представлены кривые несущих способностей для нормативных значений без учета и с учетом их деформационных характеристик. Расчетные значе-

ния несущей способности внецентренно сжатых элементов после воздействия ЦЗО приведены на графиках рис. 7, а (без учета изменчивости предельных деформаций ε_{b0}) и рис. 7, б (с учетом изменчивости предельных деформаций ε_{b0}). И что касается вывода по рис. 5 о смещении границы предельной работы — ситуация на рис. 6 и 7 полностью аналогичная.

Кривые расчетных значений несущей способности без учета воздействия ЦЗО внецентренно сжатых прямоугольных элементов с симметричной арматурой, полученные

методом предельных усилий (использование для бетона диаграммы жесткопластического тела) по СП 63, представлены на рис. 8. Сравнивая площади под ними с предыдущими графиками, полученными с использованием методов математической статистики, можно сделать вывод о том, что влияние ЦЗО бетона приводит к уменьшению при всех коэффициентах армирования несущей способности железобетонных внецентренно

сжатых элементов. Не все кривые при вероятностном расчете имеют форму параболы в отличие от расчета по СП 63. Учет влияния изменчивости деформационных характеристик приводит к увеличению различий, а расчет по нормам — к завышенным значениям несущей способности.

Определены значения коэффициента обеспеченности $K_{об}$ (рис. 9–10) и обеспеченность N (рис. 11–12) несущей способности

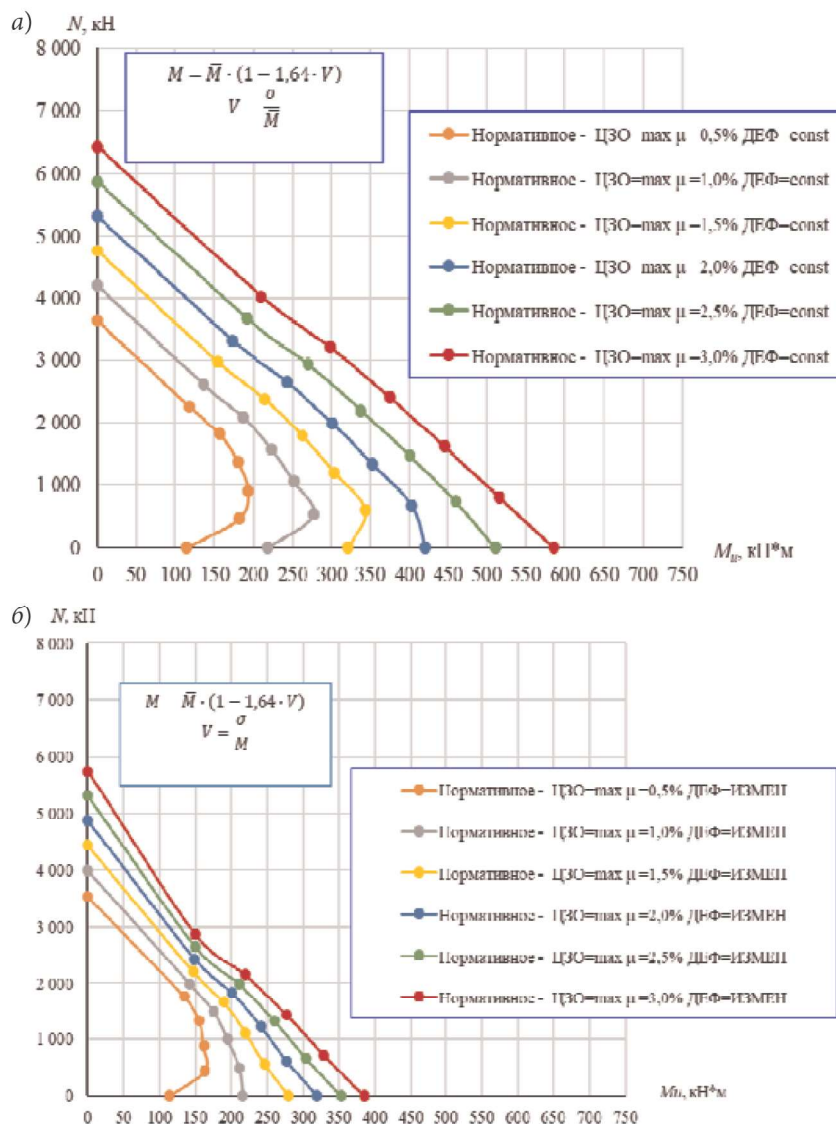


Рис. 6. Нормативные значения несущей способности внецентренно сжатых элементов прямоугольного сечения с симметричной арматурой: а — без учета изменчивости деформаций (деформации приняты по СП 63.13330.2018) после воздействия ЦЗО; б — с учетом изменчивости деформаций

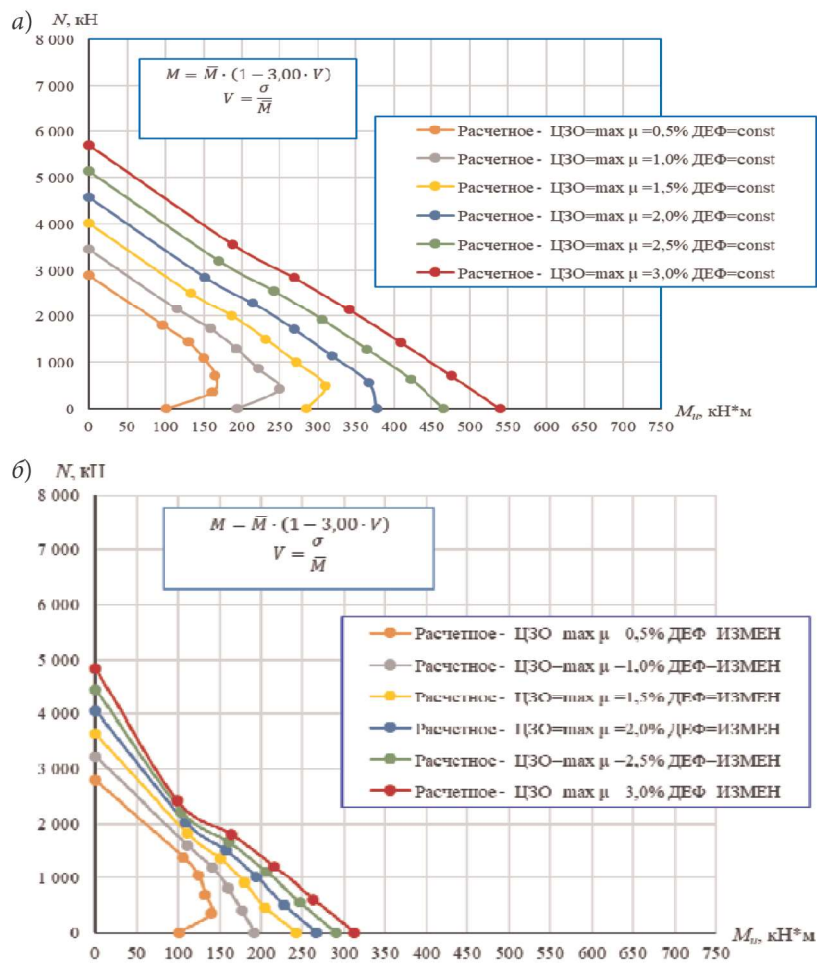


Рис. 7. Расчетные значения несущей способности внецентренно сжатых элементов прямоугольного сечения с симметричной арматурой: а — без учета изменчивости деформаций (деформации приняты по СП 63.13330.2018) после воздействия ЦЗО; б — с учетом изменчивости деформаций

после воздействия ЦЗО железобетонных внецентренно сжатых элементов. Из рис. 9, а следует, что с увеличением коэффициента армирования и отношения N/N_{\max} коэффициенты обеспеченности уменьшаются при воздействии ЦЗО без учета изменчивости деформаций. При N/N_{\max} , равном и более 0,35, они уменьшаются до значений 0,7 и менее.

При внецентренном сжатии, близком к изгибу ($N/N_{\max} = 0$), коэффициенты обеспеченности несущей способности без учета изменчивости деформаций после воздействия ЦЗО — больше 1, за исключением коэффициента армирования 3,0 % (см. рис. 9, а).

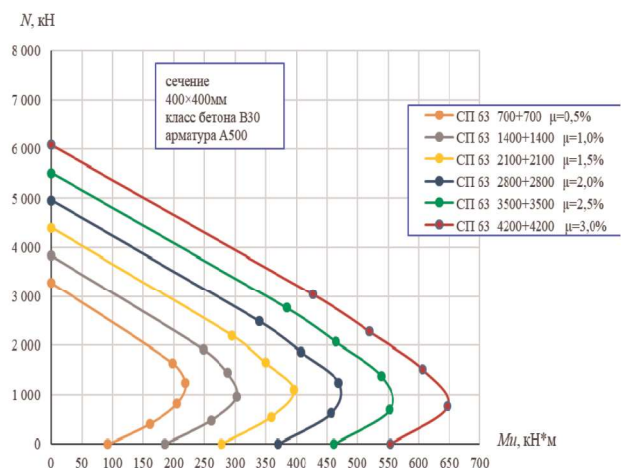


Рис. 8. Расчетные значения несущей способности по СП 63.13330.2018 прямоугольных внецентренно сжатых элементов с симметричной арматурой

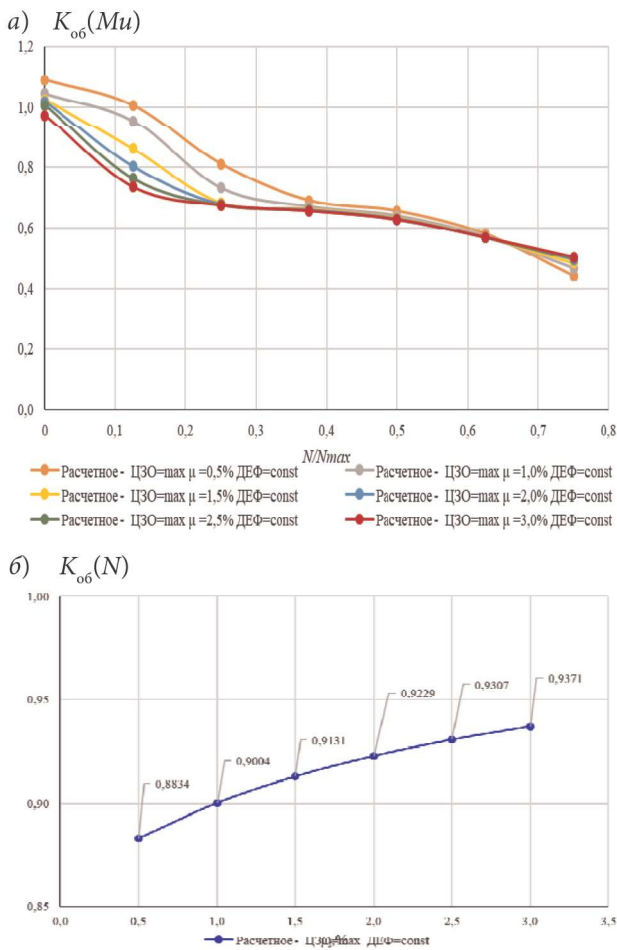


Рис. 9. Коэффициент обеспеченности несущей способности после воздействия ЦЗО без учета изменчивости деформаций железобетонных элементов: а — внецентренно сжатых; б — центрально сжатых

Значения, полученные с применением методов математической статистики, выше, чем по СП 63 при внецентренном сжатии с большим эксцентриситетом. При уменьшении значений эксцентриситета происходит уменьшение значений коэффициента обеспеченности несущей способности для всех коэффициентов армирования вплоть до значений ниже 0,6 при N/N_{max} большем 0,6, а значит, нормы могут занижать значения несущей способности при внецентренном сжатии с малыми коэффициентами по сравнению с вероятностным расчетом на 40 % и более. При этом до значений соотношения N/N_{max} , равных 0,3, идет достаточно большой

разброс значений коэффициентов обеспеченности в зависимости от коэффициента армирования, а дальше кривые сливаются практически в одну.

Для центрально сжатых элементов при воздействии ЦЗО без учета изменчивости деформаций ситуация противоположная: с увеличением коэффициента армирования происходит некоторый рост коэффициента обеспеченности с увеличением коэффициента армирования, но не более 1 (рис. 9, б).

При учете изменчивости деформаций после воздействия ЦЗО ситуация меняется (рис. 10, а). Коэффициент обеспеченности несущей способности больше 1 только при внецентренном сжатии, близком к изгибу ($N/N_{max} = 0$), для коэффициентов армирования 0,5 и 1 %. Он также снижается при уменьшении эксцентриситета и увеличении коэффициента армирования. В отличие от расчета без учета изменчивости деформаций, разница значений между различными коэффициентами армирования значительна на всем протяжении кривых, без слияния их в одну кривую. При соотношении N/N_{max} больше 0,3 коэффициенты обеспеченности уже становятся меньше 0,6, а для коэффициентов армирования 2 % и более становятся меньше 0,2. Учет изменчивости деформаций после воздействия ЦЗО приводит к значительному уменьшению коэффициентов обеспеченности несущей способности при внецентренном сжатии для всех коэффициентов армирования, а значит, происходит увеличение превышения нормами значений несущей способности по сравнению с вероятностным расчетом.

При центральном сжатии после воздействия ЦЗО учет изменчивости деформационных характеристик приводит к снижению коэффициентов обеспеченности по сравнению с расчетами без учета изменчивости (рис. 10, б). При увеличении коэффициента армирования происходит снижение коэффициента обеспеченности в отличие от предыдущего случая.

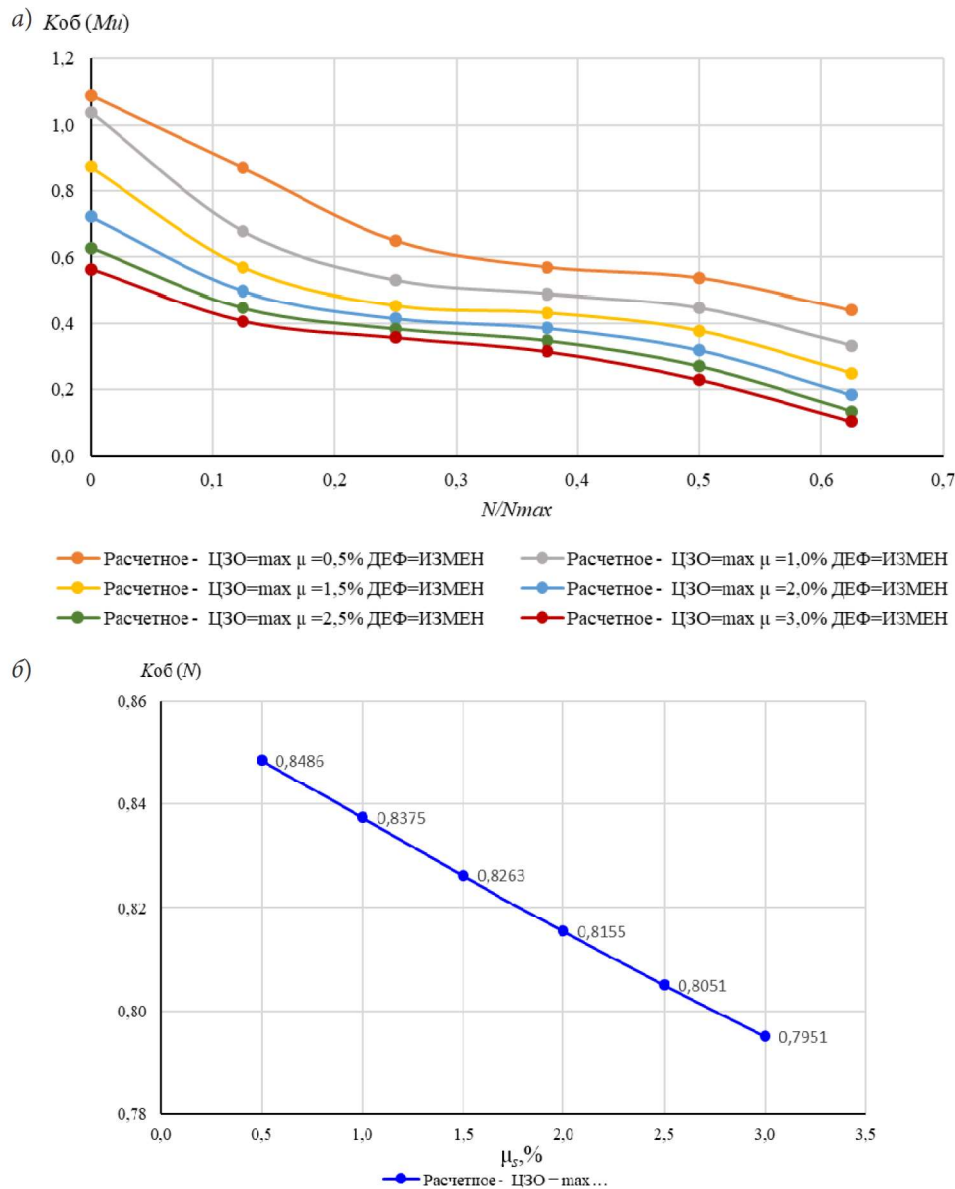


Рис. 10. Коэффициент обеспеченности после воздействия ЦЗО несущей способности с учетом изменчивости деформаций железобетонных элементов:
 а — внецентренно сжатых; б — центрально сжатых

После воздействия ЦЗО для центрально сжатого железобетонного элемента обеспеченность несущей способности, вычисленной без учета изменчивости предельных деформаций бетона ϵ_{b0} (значения ϵ_{b0} приняты по СП 63), равна 0,989 и практически не зависит от коэффициента армирования (рис. 11, а). Учет изменчивости деформационных характеристик приводит к снижению обеспеченности несущей способности

от 0,9820 при $\mu = 0,5\%$ до 0,8734 при увеличении коэффициента армирования до 3% (рис. 11, б).

Для внецентренно сжатых железобетонных элементов после ЦЗО обеспеченность несущей способности без учета изменчивости деформаций при соотношении $N/N_{max} = 0$ (чистый изгиб) составляет 0,9999 (рис. 12, а). При увеличении соотношения N/N_{max} (уменьшении эксцентриситета) про-

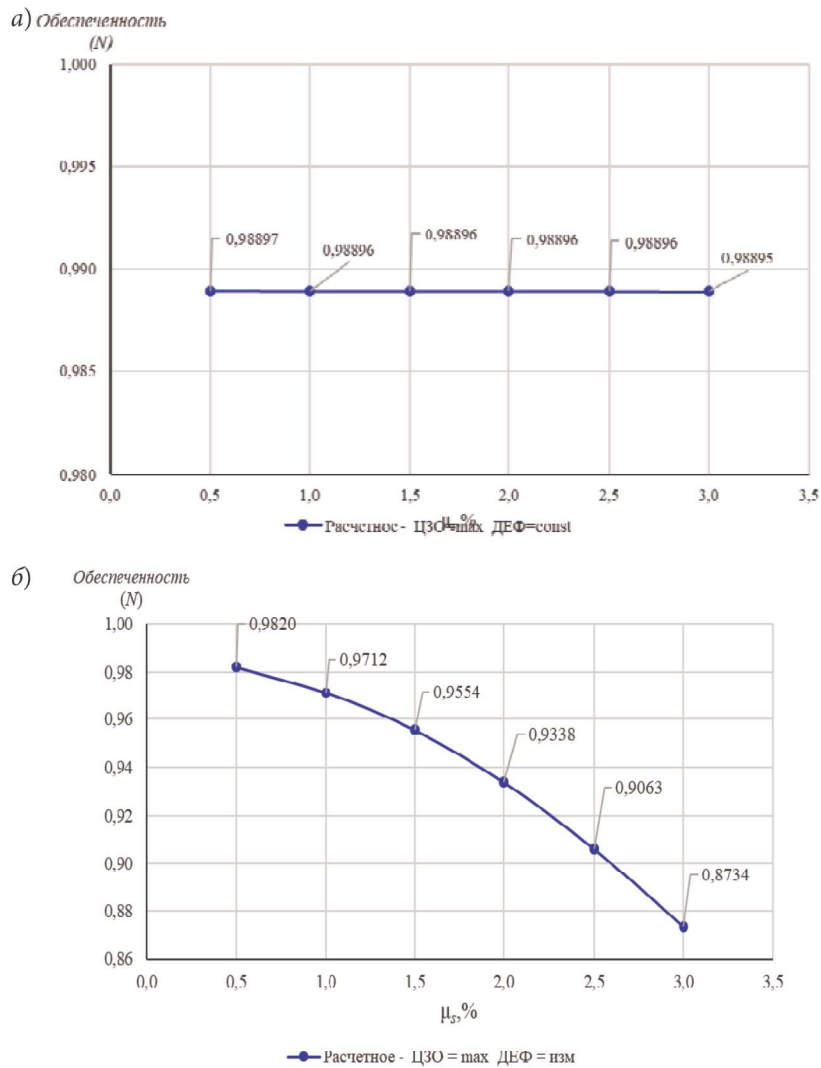


Рис. 11. Обеспеченность несущей способности при различных коэффициентах армирования железобетонного центрально сжатого элемента после воздействия ЦЗО: а — без учета изменчивости деформаций; б — с учетом изменчивости деформаций

исходит резкое снижение обеспеченности для всех коэффициентов армирования. Скорость снижения обеспеченности растет при увеличении коэффициента армирования. При N/N_{\max} больше 0,1 обеспеченность становится практически равной 0 для коэффициентов армирования 2,5 % и более, и при N/N_{\max} больше 0,2 — для коэффициентов армирования 1,5 % и более. Обеспеченность становится равной 0 при N/N_{\max} более 0,7 для всех коэффициентов армирования. Обеспеченность несущей способности умень-

шается с уменьшением эксцентриситета при воздействии ЦЗО внецентренно сжатых элементов и при малых его значениях стремится к нулю.

Согласно результатам моделирования, введение вариации предельных деформаций бетона ε_{b0} сопровождается смещением расчетных кривых в область меньшей обеспеченности несущей способности для внецентренно сжатых элементов (рис. 12, б). При коэффициенте армирования 2 % в случае чистого изгиба ($N = 0$) обеспеченность

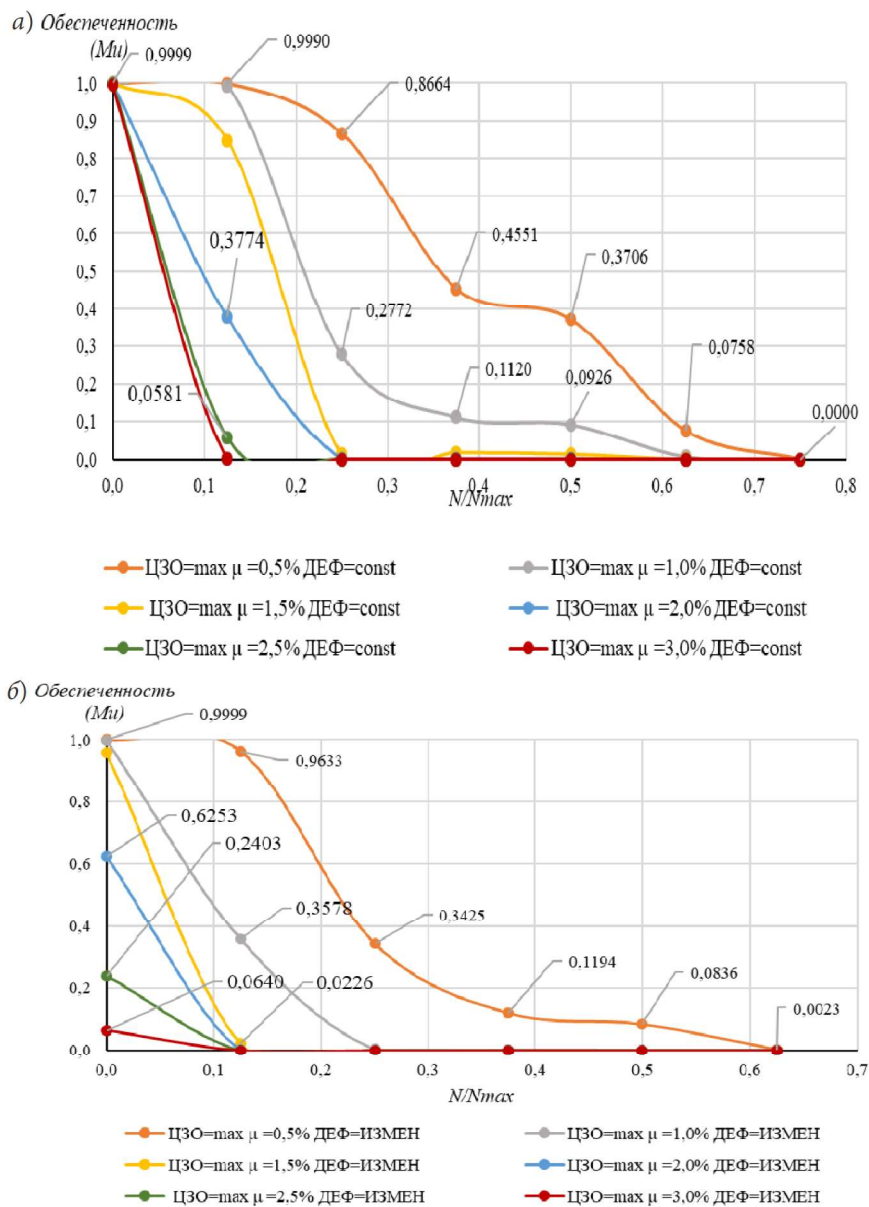


Рис. 12. Обеспеченность несущей способности при различных коэффициентах армирования железобетонного внецентренно сжатого элемента после воздействия ЦЗО: а — без учета изменчивости деформаций; б — с учетом изменчивости деформаций

становится равной 0,6, при $\mu = 2,5\%$ — 0,2403, а при $\mu = 3,0\%$ — 0,0226. При уменьшении эксцентриситета приложения продольной силы до соотношения $N/N_{max} = 0,1$ обеспеченность становится равной практически нулю для $\mu \geq 1,5\%$, а при $N/N_{max} > 0,2$ — и для $\mu = 1\%$. Результаты расчета показывают, что учет разброса деформационных характеристик после ЦЗО приводит к существенному

падению показателей обеспеченности несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов, причем в области малых эксцентриситетов продольной силы данные показатели практически обнуляются. Поэтому при расчете внецентренно сжатых железобетонных элементов в условиях воздействия ЦЗО необходимо принимать расчетное сопротивление арматуры сжатию

с учетом изменчивости предельных относительных деформаций бетона ϵ_{b0} .

Выводы

1. При назначении расчетного сопротивления арматуры класса А500 в условиях воздействия ЦЗО необходимо учитывать изменчивость предельных относительных деформаций бетона ϵ_{b0} .

2. Расчетный анализ показал, что чувствительность несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов к разбросу предельных деформаций бетона после ЦЗО обусловлена эксцентриситетом продольной силы и увеличивается при повышении уровня армирования.

3. Использование средних значений деформационных характеристик бетона в расчете при ЦЗО железобетонных внецентренно сжатых элементов завышает несущую способность и уменьшает ее обеспеченность.

4. Для решения выявленных проблем необходимо проведение дальнейших исследований.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта СПбГАСУ на 2025 год.

Библиографический список

1. Горбатов С. В., Смирнов С. Г. Расчёт прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов прямоугольного сечения на основе нелинейной деформационной модели // Вестник МГСУ. 2011. № 2–1. С. 72–76.

2. Радайкин О. В. Теоретические основы диаграммно-метода расчёта стержневых элементов из армированного бетона // Строительство и реконструкция. 2020. № 6 (92). С. 26–42.

3. Манаенков И. К. Сравнительный анализ результатов расчета гибких внецентренно сжатых железобетонных колонн по нелинейной деформационной модели // Инженерный вестник Дона. 2024. № 3 (111). С. 606–618.

4. Истомин А. Д. Влияние циклического замораживания и оттаивания на диаграмму деформирования сжатого бетона // Строительство и реконструкция. 2023. № 5 (109). С. 36–44.

5. Истомин А. Д., Назаров Т. А. Влияние природных циклов замораживания–оттаивания на проч-

ность и деформативность бетона // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2019. № 3 (381). С. 52–56.

6. Цирулев И. В., Раткин В. В. Анализ влияния циклов замораживания–оттаивания на железобетонные конструкции. Ч. 2: Анализ экспериментальных данных // Флагман науки. 2024. № 8 (19). С. 104–115.

7. Diao B., Sun Y., Ye Y., Cheng S. Impact of seawater corrosion and freeze-thaw cycles on the behavior of eccentrically loaded reinforced concrete columns // Ocean Systems Engineering. 2012. Vol. 2 (2). Pp. 159–171.

8. Wu J., Zhang J., Diao B., Cheng S., Ye Y. Hysteretic behavior of eccentrically loaded reinforced air-entrained concrete columns under combined effects of freeze-thaw cycles and seawater corrosion // Advances in Civil Engineering. 2018. 3931791.

9. Zhang W., Pi Y., Kong W., Zhang Y., Wu P., Zeng W., Yang F. Influence of damage degree on the degradation of concrete under freezing-thawing cycles // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 260 (1–2). 119903.

10. Евтушенко И. И., Вахидов Р. Н., Барамия А. Л., Пустовалов С. А., Зотов В. В., Нор-Аревян С. Л., Нуриев В. Э. Об особенностях методик расчёта внецентренно сжатых железобетонных элементов // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4 (47). С. 239.

11. Маилян Д. Р., Мурадян В. А. К методике расчета железобетонных внецентренно сжатых колонн // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4–2 (23). С. 182.

12. Старишко И. Н. Расчет несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов при различных значениях эксцентриситетов приложения продольных сил // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015. № 5. С. 21–33.

13. 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.

14. Плюснин М. Г., Цыбакин С. В. Армирование внецентренно сжатых элементов железобетонных конструкций в условиях воздействия знакопеременных температур // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 2 (97). С. 38–43.

15. Попов В. М., Плюснин М. Г. Экспериментальное исследование диаграмм $\sigma - \epsilon$ бетона при одноосном сжатии и влияния на их форму циклов замораживания и оттаивания // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 80–88.

16. Попов В. М., Пухаренко Ю. В., Плюснин М. Г., Белов В. В. Оценка влияния значения предельных деформаций бетона при сжатии на обеспеченность результатов расчета прочности внецентренно сжа-

того железобетонного элемента по нормальному сечению с использованием нелинейной деформационной модели // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 6 (89). С. 42–50.

17. 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.

18. Duan A., Jin W., Qian J. Effect of freeze–thaw cycles on the stress–strain curves of unconfined and confined concrete // *Materials and Structures*. 2011. Vol. 44 (7). Pp. 1309–1324.

19. Wang R., Liu Y., Liu J., Li Y., Jin R., Liang G., Yu N., Hu J., Zhou H., Jia Y., Liu Y. Mesoscopic numerical simulation of freeze–thaw damage in hydraulic concrete // *Buildings*. 2024. Vol. 14 (9). 2694.

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

21. Исайкин А. Я. Оценка надежности статически неопределимых железобетонных конструкций на основе метода предельного равновесия: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2000. 405 с.

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025693946 Российская Федерация. Siga61 : заявл. 14.11.2025 : опубли. 03.12.2025 / В. М. Попов, О. А. Яцковец ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет». EDN RUYZKY.

References

1. Gorbatov S. V., Smirnov S. G. *Raschyot prochnosti vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov pryamougol'nogo secheniya na osnove nelineynoy deformatsionnoy modeli* [Calculation of strength of eccentrically compressed reinforced concrete elements of rectangular section on the basis of nonlinear deformation model]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2011, no. 2–1, pp. 72–76.

2. Radaykin O. V. *Teoreticheskie osnovy diagrammnogo metoda raschyota sterzhnevyykh elementov iz armirovannogo betona* [Theoretical foundations of the diagram method for calculating rod elements from reinforced concrete]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya – Construction and reconstruction*, 2020, no. 6 (92), pp. 26–42.

3. Manaenkov I. K. *Sravnitel'nyy analiz rezul'tatov rascheta gibkikh vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh kolonn po nelineynoy deformatsionnoy modeli* [Comparative analysis of results of calculation of flexible eccentrically compressed reinforced concrete columns by nonlinear deformation model]. *Inzhenerniy vestnik Dona – Don Engineering Bulletin*, 2024, no. 3 (111), pp. 606–618.

4. Istomin A. D. *Vliyanietsiklicheskogozamorazhivaniya i ottaivaniya na diagrammu deformirovaniya szhatogo betona* [Influence of cyclic freezing and thawing on the diagram of compressed concrete deformation]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya – Construction and reconstruction*, 2023, no. 5 (109), pp. 36–44.

5. Istomin A. D., Nazarov T. A. *Vliyanie prirodnykh tsiklov zamorazhivaniya – ottaivaniya na prochnost' i deformativnost' betona* [Influence of natural freezing–thawing cycles on concrete strength and deformability]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti – Proceedings of Higher Educational Institutions. Textile Industry Technology*, 2019, no. 3 (381), pp. 52–56.

6. Tsirulev I. V., Ratkin V. V. *Analiz vliyaniya tsiklov zamorazhivaniya-ottaivaniya na zhelezobetonnye konstruksii. Chast' 2: Analiz eksperimental'nykh dannykh* [Analysis of the effect of freeze–thaw cycles on reinforced concrete structures. Part 2: Analysis of experimental data]. *Flagman nauki – Flagship of Science*, 2024, no. 8 (19), pp. 104–115.

7. Diao B., Sun Y., Ye Y., Cheng S. Impact of seawater corrosion and freeze–thaw cycles on the behavior of eccentrically loaded reinforced concrete columns. *Ocean Systems Engineering*, 2012, vol. 2 (2), pp. 159–171.

8. Wu J., Zhang J., Diao B., Cheng S., Ye Y. Hysteretic behavior of eccentrically loaded reinforced air-entrained concrete columns under combined effects of freeze–thaw cycles and seawater corrosion. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 3931791.

9. Zhang W., Pi Y., Kong W., Zhang Y., Wu P., Zeng W., Yang F. Influence of damage degree on the degradation of concrete under freezing–thawing cycles. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 260 (1–2), 119903.

10. Evtushenko I. I., Vakhidov R. N., Baramiya A. L., Pustovalov S. A., Zotov V. V., Nor-Arevyan S. L., Nuriev V. E. *Ob osobennostyakh metodik raschyota vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov* [On the features of methods for calculating eccentrically compressed reinforced concrete elements]. *Inzhenerniy vestnik Dona – Don Engineering Bulletin*, 2017, no. 4 (47), 239 p.

11. Mailyan D. R., Muradyan V. A. *K metodike rascheta zhelezobetonnykh vnetsentrenno szhatykh kolonn* [To the methodology for calculating reinforced concrete

eccentrically compressed columns]. *Inzhenerniy vestnik Dona – Don Engineering Bulletin*, 2012, no. 4–2 (23), 182 p.

12. Starishko I. N. *Raschet nesushchey sposobnosti vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov pri razlichnykh znacheniyakh eksentrisitetov prilozheniya prodol'nykh sil* [Calculation of bearing capacity of eccentrically compressed reinforced concrete elements at different values of eccentricities of application of longitudinal forces]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy – Construction Mechanics of Engineering Facilities and Structures*, 2015, no. 5, pp. 21–33.

13. Plyusnin M. G. *Vliyanie tsiklov zamorazhivaniya i ottaivaniya na nesushchuyu sposobnost' vnetsentrenno szhatykh elementov zhelezobetonnykh konstruksiy* [Influence 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.

14. Plyusnin M. G., Tsybakin S. V. *Armirovaniye vnetsentrenno szhatykh elementov zhelezobetonnykh konstruksiy v usloviyakh vozdeystviya znakoperemennykh temperatur* [Reinforcement of eccentrically compressed elements of reinforced concrete structures under the influence of alternating temperatures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2023, no. 2 (97), pp. 38–43.

15. Popov V. M., Plyusnin M. G. *Eksperimental'noe issledovaniye diagramm $\sigma - \epsilon$ betona pri odnoosnom szhatii i vliyaniya na ikh formu tsiklov zamorazhivaniya i ottaivaniya* [Experimental study of σ diagrams - concrete ϵ under uniaxial compression and the effect on their shape of freezing and thawing cycles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 4 (81), pp. 80–88.

16. Popov V. M., Pukharenko Yu. V., Plyusnin M. G., Belov V. V. *Otsenka vliyaniya znacheniya predel'nykh deformatsiy betona pri szhatii na obespechennost' rezul'tatov rascheta prochnosti vnetsentrenno szhatogo zhelezobetonnoogo elementa po normal'nomu secheniyu s ispol'zovaniem nelineynoy deformatsionnoy modeli* [Evaluation of the impact of the value of limit deformations of concrete during compression on the reliability of the results of calculating the strength of an eccentrically

compressed reinforced concrete element along the normal section using a nonlinear deformation model]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2021, no. 6 (89), pp. 42–50.

17. 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 availability of calculation results for bearing capacity along normal section of eccentrically compressed reinforced concrete elements using nonlinear deformation model under freezing and thawing cycles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2021, no. 2 (85), pp. 57–67.

18. Duan A., Jin W., Qian J. Effect of freeze–thaw cycles on the stress–strain curves of unconfined and confined concrete. *Materials and Structures*, 2011, vol. 44 (7), pp. 1309–1324.

19. Wang R., Liu Y., Liu J., Li Y., Jin R., Liang G., Yu N., Hu J., Zhou H., Jia Y., Liu Y. Mesoscopic numerical simulation of freeze–thaw damage in hydraulic concrete. *Buildings*, 2024, vol. 14 (9), 2694.

20. Popov V. M., Pinus B. I., Plyusnin M. G., Kondrateva L. N. *Vliyanie izmenchivosti deformatsionnykh kharakteristik betona na nadezhnost' szhatykh zhelezobetonnykh konstruksiy* [Influence of variability of deformation characteristics of concrete on reliability of compressed reinforced concrete structures]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing Construction*, 2025, no. 1–2, pp. 91–95.

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

22. Popov V.M., Yatskovets O.A. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EhVM no. 2025693946 ot 03.12.2025. Siga 61 / V. M. Popov, O. A. Yatskovets ; Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet». Publ. no. 2025693946 ; zayavl. 14.11.2025. EDN RUYZKY.*