

Статистические закономерности конструктивных характеристик изгибаемых железобетонных элементов в условиях знакопеременных температур

В.М. Попов, О.А. Яцковец

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет*

Аннотация: В действующих нормативных документах по проектированию железобетонных конструкций принят ряд условных предпосылок и ограничений, учитывающих специфику сопротивления конструктивных элементов и упрощающих расчет. Одной из них является назначение деформационных свойств бетона как среднестатистических величин, которые наравне с прочностными, определяют диаграммы деформирования материала. Воздействие циклов замораживания и оттаивания бетона (ЦЗО) приводит к деградации его деформационных и прочностных свойств. Характер разрушения изгибаемого железобетонного элемента зависит от прочностных и деформационных свойств бетона и арматуры и коэффициента армирования. В работе исследуются статистические закономерности предельного коэффициента армирования и граничной относительной высоты сжатой зоны бетона в условиях переменного замораживания и оттаивания бетона.

Ключевые слова: циклы замораживания и оттаивания, статистические закономерности сопротивления, железобетон, предельные деформации бетона, обеспеченность, граничная относительная высоты сжатой зоны бетона, коэффициент армирования.

Введение

В северных регионах конструкции из железобетона подвергаются влиянию низких знакопеременных температур. При воздействии попеременного замораживания и оттаивания происходит трансформация диаграммы деформирования бетона при осевом сжатии. При первом замораживании модуль упругости бетона увеличивается, пиковое напряжение увеличивается, а пиковая деформация уменьшается [1-3]. В статье [4] отмечается, что при воздействии циклов замораживания и оттаивания бетона (ЦЗО) его прочность снижается, среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации прочности увеличиваются. Бетон в этом случае характеризуется другим распределением прочности. Переменное замораживание и оттаивание бетона изменяет предельные деформации бетона, влияет на характер деформирования бетона, снижает предельный

коэффициент армирования и граничную относительную высоту сжатой зоны бетона [5,6]. Также, при влиянии знакопеременных температур в бетоне наблюдается рост остаточных деформаций расширения, которые приводят к дополнительным напряжениям в арматуре и которые тем меньше, чем больше процент армирования [7]. В статье [8] рекомендуется учитывать неблагоприятное влияние ЦЗО на характеристики бетона либо отдельно по показателям прочности и деформативности, либо интегрально по расчетной величине энергии диссипации. Также, степень снижения модуля упругости и прочностных характеристик бетона при влиянии знакопеременных температур зависит от способа водонасыщения образцов [9]. Работы [10-12] посвящены разработке физико-механической модели разрушения бетона в условиях попеременного замораживания и оттаивания и развитию диаграммного метода расчета железобетонных конструкций в условиях низких температур. В работе [13] рассмотрено влияние знакопеременных температур на трансформацию диаграмм деформирования бетона. Влияние технологических факторов на морозостойкость монолитных железобетонных конструкций приведены в статьях [14-16].

Цель и методика исследования

Цель работы – исследовать статистические закономерности предельного коэффициента армирования и граничной относительной высоты сжатой зоны бетона в условиях переменного замораживания и оттаивания бетона.

Методологию настоящей работы составляют методы теории вероятности, математической статистики и численное моделирование напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов железобетонных конструкций.

Описание исследования

В изгибаемых железобетонных элементах возможны три варианта разрушения по нормальному сечению в зависимости от коэффициента армирования продольной арматуры. Первый случай разрушения начинается с появления пластических деформаций в продольной арматуре и заканчивается разрушением бетона в сжатой зоне. Прочностные характеристики арматуры используются полностью. При большом коэффициенте армирования может иметь место хрупкое разрушение, при котором разрушение происходит по сжатой зоне бетона, а напряжения в арматуре не достигают предела текучести. Прочность арматуры в этом случае используется не полностью. Третий случай разрушения характерен для мало армированных элементов. Разрушение наступает при появлении нормальной трещины в растянутой зоне бетона, происходит физический разрыв растянутой арматуры. Для исключения этого варианта разрушения в нормах проектирования железобетонных конструкций (СП 63) рекомендуется принимать коэффициент армирования не меньше минимального ($\mu_{min}=0,1\%$).

При расчете изгибаемых железобетонных элементов по нормальным сечениям по предельным усилиям в предположении, что диаграмма деформирования бетона принимается как диаграмма жесткопластического тела (рис.1, сплошная линия), высота расчетной сжатой зоны бетона x определяется из уравнения предельного равновесия продольных усилий по формуле (1).

$$R_b \cdot b \cdot x = R_s \cdot A_s, \quad (1)$$

При выполнении условия (2) предполагается пластическое разрушение

$$\xi = \frac{x}{h_0} \leq \xi_R; \quad \sigma_s = R_s, \quad (2)$$

где ξ_R – значение граничной относительной высоты сжатой зоны бетона предлагается определять по формуле (3)

$$\xi_R = \frac{\omega}{1 + \frac{\varepsilon_{s,el}}{\varepsilon_{b2}}}, \quad (3)$$

где $\omega = 0,8$ для бетона класса до В60 включительно;

$\varepsilon_{b2} = 0,0035$; $\varepsilon_{s,el} = \frac{R_s}{E_s}$; R_s – расчетное сопротивления арматуры; E_s – модуль

упругости арматуры.

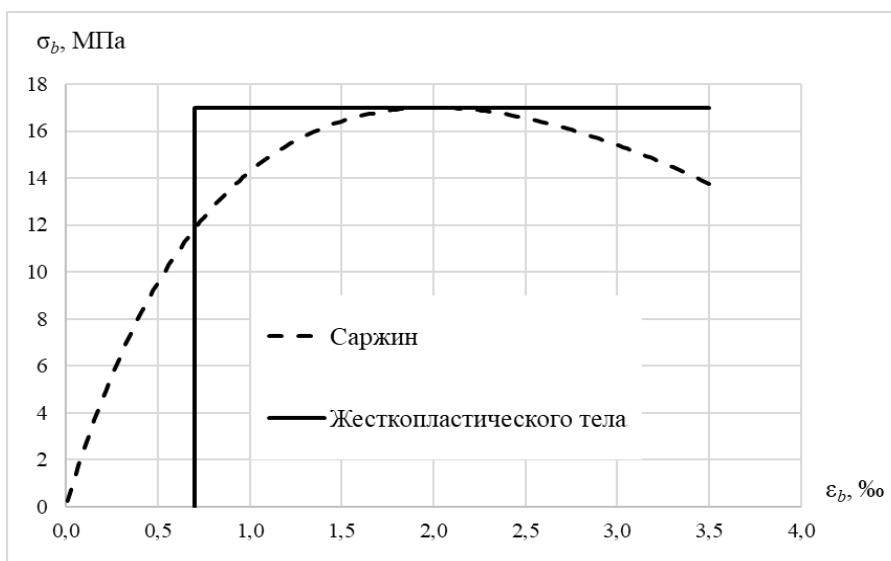


Рис. 1 – Диаграмма деформирования бетона класса В30

В этом случае условия прочности определяется по формулам (4) или (5):

$$M \leq M_u = R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - 0,5 \cdot x), \quad (4)$$

$$M \leq M_u = R_s \cdot A_s \cdot (h_0 - 0,5 \cdot x), \quad (5)$$

Хрупкое разрушение предполагается, если выполняется условие (6):

$$\xi = \frac{x}{h_0} > \xi_R; \quad \sigma_s < R_s, \quad (6)$$

В этом случае условия прочности, согласно нормам проектирования, записываются в виде условия (7):

$$M \leq M_u = R_b \cdot b \cdot x_R \cdot (h_0 - 0,5 \cdot x_R) = R_b \cdot b \cdot h_0^2 \cdot \alpha_R, \quad (7)$$

где $\alpha_R = \xi_R \cdot (1 - 0,5 \cdot \xi_R)$; $\alpha_m = \xi \cdot (1 - 0,5 \cdot \xi)$.

В Пособии к СП 63.13330 в случае хрупкого разрушения допускается несколько увеличить несущую способность по формуле (8):

$$M \leq M_u = R_b \cdot b \cdot h_0^2 \cdot (0,7 \cdot \alpha_R + 0,3 \cdot \alpha_m), \quad (8)$$

Зависимость несущей способности изгибаемого железобетонного элемента сечением 400×200 мм, из бетона класса В30 и арматурой класса А400 ($R_s = 340$ МПа) от различных коэффициентов армирования показана на графиках рис. 2.

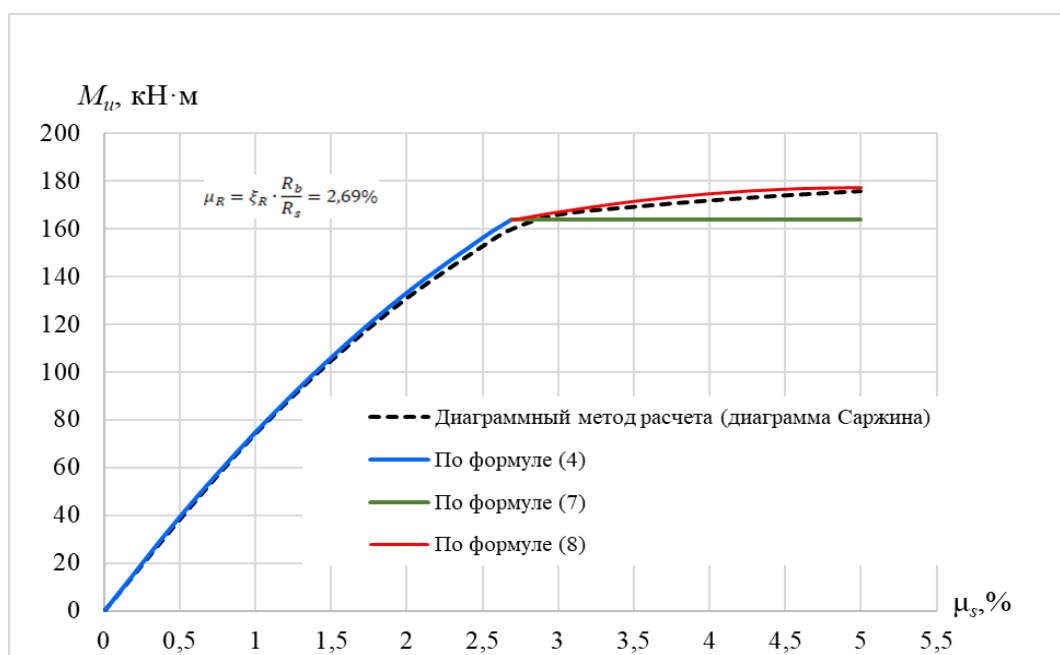


Рис. 2. – Зависимость несущей способности изгибаемого железобетонного элемента при различных коэффициентах армирования

Исходными данными для анализа обеспеченности деформационных и прочностных характеристик бетона являются 5000 диаграмм деформирования бетона и арматурной стали [17], полученные на основе результатов экспериментальных исследований при помощи метода Монте-Карло.

Для определения изменчивости деформационных и прочностных свойств бетона исходные данные были проанализированы при помощи методов математической статистики. Также, для анализа обеспеченности

коэффициента наполнения эпюры ω , граничной относительной высоты сжатой зоны бетона ξ_R и предельного коэффициента армирования μ_R (максимальный коэффициент армирования при котором напряжения в арматуре достигают предела текучести) для разных классов арматуры были выполнены расчеты изгибаемых железобетонных элементов сечением 200×400 мм диаграммным методом с использованием 5000 диаграмм деформирования бетона (до и после воздействия ЦЗО) и 5000 диаграмм деформирования арматуры классов А400 и А500 с использованием разработанной авторами компьютерной программы.

В данной работе были проанализированы следующие параметры: предельный коэффициент армирования μ_R , граничная относительная высота сжатой зоны бетона ξ_R , коэффициент наполнения эпюры ω , коэффициенты обеспеченности и обеспеченность этих параметров.

Коэффициент обеспеченности [18] $K_{об}$ – отношение значения параметров, рассчитанных по вероятностному методу (с учетом и без учета ЦЗО и арматуры классов А400 и А500), к значению тех же параметров, определенных по СП 63 – формула (9):

$$\left. \begin{aligned} K_{об}(\omega) &= \frac{\omega_{(вер)}}{\omega_{(СП63)}} \\ K_{об}(\xi_R) &= \frac{\xi_{R(вер)}}{\xi_{R(СП63)}} \\ K_{об}(\mu_R) &= \frac{\mu_{R(вер)}}{\mu_{R(СП63)}} \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где $\omega_{(вер)}$, $\xi_{R(вер)}$, $\mu_{R(вер)}$ – коэффициент наполнения эпюры, граничная относительная высота сжатой зоны бетона и предельный коэффициент армирования, вычисленные вероятностным методом с использованием диаграммного метода расчета (с учетом и без учета ЦЗО и арматуры классов А400 и А500);

$\omega_{(СП\ 63)}$, $\xi_{R(СП\ 63)}$, $\mu_{R(СП\ 63)}$ – коэффициент заполнения эпюры, граничная относительная высота сжатой зоны бетона и предельный коэффициент армирования, определенные по нормам проектирования железобетонных конструкций СП 63.13330.2018.

Обеспеченность параметров коэффициента заполнения эпюры ω , граничной относительной высоты сжатого бетона ξ_R и предельного коэффициента армирования μ_R при различных средовых воздействиях (с учетом и без учета ЦЗО), рассчитанная по СП 63, определялась по формуле (10):

$$\left. \begin{aligned} \text{Обеспеченность}(\omega) &= 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\omega_{СП63}-\omega)^2}{2\sigma^2}} \\ \text{Обеспеченность}(\xi_R) &= 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\xi_{R,СП63}-\xi_R)^2}{2\sigma^2}} \\ \text{Обеспеченность}(\mu_R) &= 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\mu_{R,СП63}-\mu_R)^2}{2\sigma^2}} \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение указанных параметров.

Анализ результатов

Коэффициент заполнения эпюры ω , принятый в нормах проектирования железобетонных конструкций равным 0,8 для бетонов классом до В60 включительно, характеризует упругопластические свойства бетона. Значения коэффициента заполнения эпюры ω определялись как случайные величины. Случайное значение фактической высоты сжатой зоны бетона $x_{ф,i}$ определялось из гипотезы плоских сечений с использованием случайных значений предельных деформаций бетона $\varepsilon_{b2,i}$ и деформаций арматуры $\varepsilon_{s,el,i}$. Диаграммным методом по специально разработанной компьютерной программе вычислялись 5000 значений усилий в сжатом бетоне до и после воздействия ЦЗО и в растянутой арматуре класса А400 и

A500, и рассчитывались значения граничной высоты сжатой зоны бетона как случайной величины по формуле (11):

$$x_{R,i} = \frac{N_{b,i}}{R_{b,i} \cdot b}, \quad (11)$$

где $N_{b,i}$ – усилия в сжатом бетоне (случайная величина);

$R_{b,i}$ – случайное значение призменной прочности бетона;

b – ширина сечения изгибаемого железобетонного элемента.

Случайная величина коэффициента наполнения эпюры определялась (рис.3) по формуле (12):

$$\omega_i = \frac{x_{R,i}}{x_{\phi,i}}, \quad (12)$$

Средние, нормативные и расчетные значения коэффициентов наполнения эпюры до и после воздействия ЦЗО, арматуры классов А400 и А500 определялись по формулам (13)–(15).

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{\sum \omega_i}{n}, \quad (13)$$

$$\omega_n = (1 - 1,64 \cdot V) \cdot \omega_{\text{ср}}, \quad (14)$$

$$\omega_p = (1 - 3,00 \cdot V) \cdot \omega_{\text{ср}}, \quad (15)$$

Кривые плотности распределения коэффициентов наполнения эпюры ω до и после воздействия ЦЗО представлены на рис. 4. Воздействие ЦЗО уменьшает значения параметра ω , о чем свидетельствует смещение кривых распределения влево.

Средние, нормативные и расчетные значения коэффициентов наполнения эпюры ω , определенные вероятностным методом, приведены в таблице 1. Воздействие переменного замораживания и оттаивания бетона привело к понижению средних значений коэффициентов наполнения эпюры на 8,2% и к уменьшению коэффициента вариации с 4,56% до 3,91%. Поэтому

расчетные значения коэффициентов наполнения эпюры после воздействия попеременного замораживания и оттаивания бетона, определенные по формуле (6), снизились меньше на 6,1%.

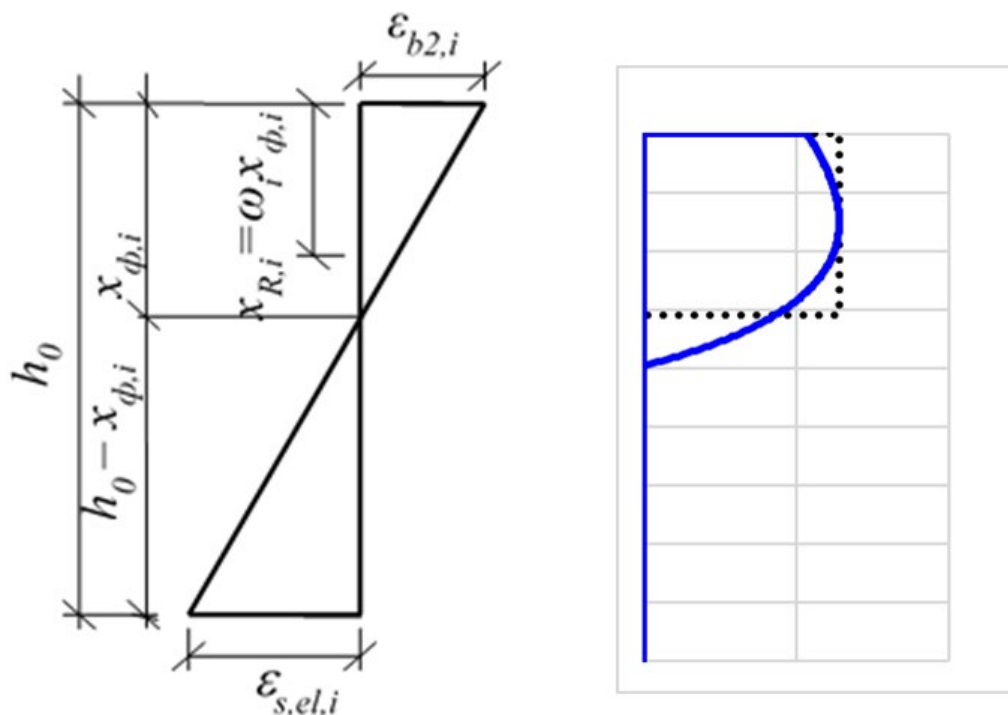


Рис. 3. – Распределение деформаций по рабочей высоте сечения и распределение напряжений по высоте сжатой зоны бетона (определялось с применением диаграммы деформирования бетона Саржина)

Коэффициенты обеспеченности коэффициентов наполнения эпюры ω до и после воздействия ЦЗО бетона приведены в таблице 2. Воздействие ЦЗО бетона привело к снижению коэффициента обеспеченности ω для расчетного значения на 6,2%, а для среднего значения на 8,3%. Это можно объяснить снижением коэффициента вариации с 4,56% до воздействия ЦЗО до 3,91% – после воздействия ЦЗО. Значение обеспеченности коэффициентов наполнения эпюры ω (СП 63), определяемой по формуле (10), приведенные в таблице 3, очень малы. Воздействие переменного замораживания и оттаивания бетона еще больше снизили обеспеченность коэффициентов наполнения эпюры ω .

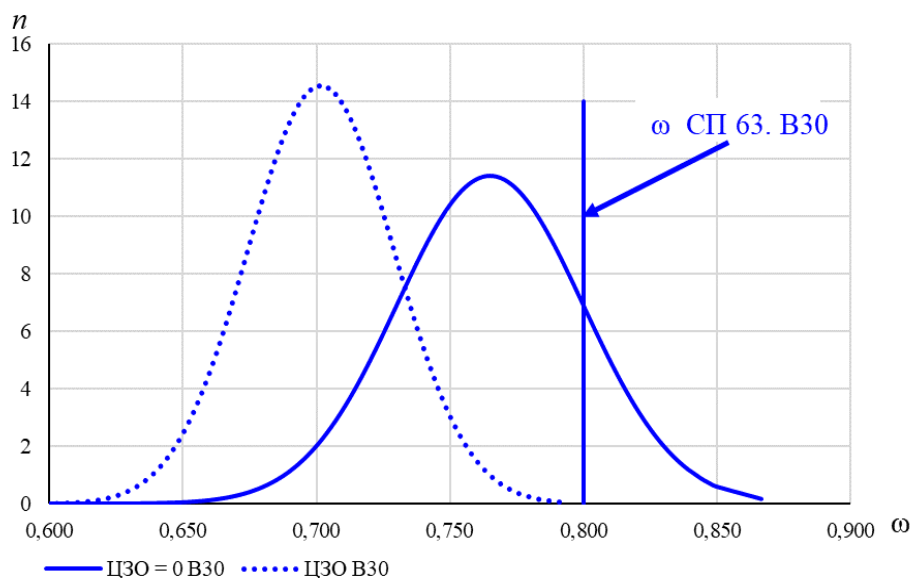


Рис. 4. – Кривые плотности распределения вероятности коэффициента
наполнения эпюры ω

Таблица 1

Средние, нормативные и расчетные значения коэффициентов наполнения
эпюры ω до и после ЦЗО

	ЦЗО = 0	ЦЗО
$\omega_{\text{ср}}$	0,765	0,702
$V, \%$	4,56	3,91
$\omega_{\text{н}}$	0,708	0,657
$\omega_{\text{р}}$	0,660	0,620
ω СП63	0,8	

Таблица 2

Коэффициенты обеспеченности коэффициентов наполнения эпюры ω до и
после воздействия ЦЗО бетона

	ЦЗО=0	ЦЗО
Средние	0,9564	0,8771
Нормативные	0,8848	0,8209
Расчетные	0,8255	0,7743

Таблица 3

Обеспеченности коэффициентов заполнения эпюры ω до и после
воздействия ЦЗО бетона

	ЦЗО=0	ЦЗО
Обеспеченность	0,1585	0,0002

Случайное значение граничной относительной высоты сжатой зоны бетона $\xi_{R,i}$ определялось по формуле (16)

$$\xi_{R,i} = \frac{x_{R,i}}{h_0}, \quad (16)$$

Средние, нормативные и расчетные значения граничной относительной высоты сжатой зоны бетона ξ_R для разных классов арматуры до и после воздействия ЦЗО определялись по формулам (17)-(19):

$$\xi_{R,sp} = \frac{\sum \xi_{R,i}}{n}, \quad (17)$$

$$\xi_{R,n} = (1 - 1,64 \cdot V) \cdot \xi_{R,sp}, \quad (18)$$

$$\xi_{R,p} = (1 - 3,00 \cdot V) \cdot \xi_{R,sp}, \quad (19)$$

Средние, нормативные и расчетные значения граничной относительной высоты сжатой зоны бетона ξ_R для разных классов арматуры до и после воздействия ЦЗО представлены в таблице 4. На графиках рис. 5 показаны кривые плотности распределения вероятности граничной относительной высоты сжатой зоны бетона ξ_R для разных классов арматуры А400 и А500 до и после воздействия ЦЗО. Воздействие ЦЗО приводит к снижению значений ξ_R , о чем свидетельствует смещение кривой распределения влево. Значение коэффициента вариации ξ_R после ЦЗО меняется незначительно для арматуры класса А400 (2,2 %) и на 11,6 % при арматуре класса А500. Значения ξ_R вычисленные вероятностным методом значительно ниже, чем при расчете по нормам. Влияние ЦЗО приводит к еще большему снижению значений ξ_R . Это связано с тем, что при расчете по СП63 ξ_R напрямую зависит от величины ϵ_{b2} ,

которая, как было показано ранее, принята как средняя величина. Также, ξ_R зависит и от ω , которое также завышено в нормах.

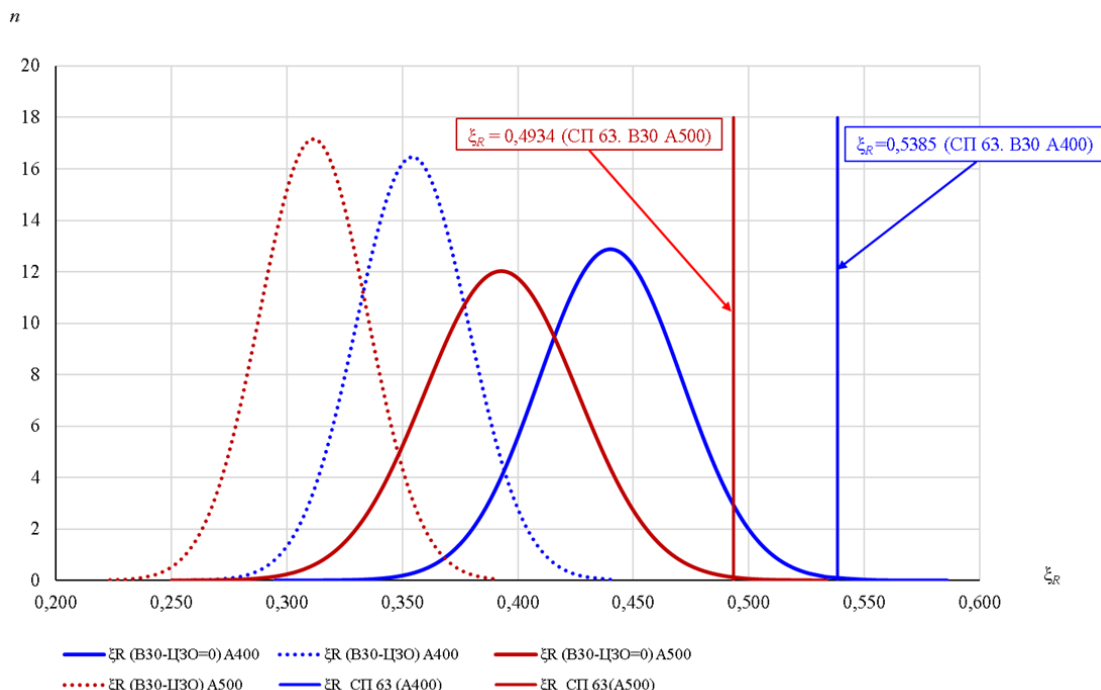


Рис. 5. – Кривые плотности распределения вероятности граничной относительной высоты сжатой зоны бетона ξ_R

Таблица 4

Средние, нормативные, расчетные значения ξ_R и коэффициент вариации до и после ЦЗО для разных классов арматуры

	Класс бетона В30			
	$R_s = 340$ МПа		$R_s = 435$ МПа	
	ЦЗО = 0	ЦЗО	ЦЗО = 0	ЦЗО
$\xi_{R,sp}$	0,4401	0,3543	0,3928	0,3115
$V, \%$	7,04%	6,84%	8,45%	7,47%
$\xi_{R,n}$	0,3893	0,3145	0,3384	0,2733
$\xi_{R,p}$	0,3471	0,2816	0,2933	0,2417
ξ_R СП63	0,5385		0,4934	

Значения коэффициентов обеспеченности расчетных значений граничной относительной высоты сжатой зоны бетона ξ_R , приведены в таблице 5. В таблице 6 приведены значения обеспеченностей ξ_R по нормам

проектирования (СП 63). Коэффициенты обеспеченности граничной относительной высоты сжатой зоны бетона ξ_R снижается после воздействия ЦЗО. Обеспеченность граничной относительной высоты сжатой зоны бетона ξ_R после ЦЗО по нормам проектирования железобетонных конструкций становится равной нулю. Все это подтверждает ранее сделанные выводы о том, что расчет по нормам значительно завышает значения ξ_R . При этом, для расчетных, нормативных и средних значений с повышением класса арматуры происходит снижение обеспеченности и коэффициента обеспеченности ξ_R .

Таблица 5

Коэффициент обеспеченности ξ_R для бетона класса В30 до и после ЦЗО для арматуры класса А400 и А500

Класс арматуры	$K_{\text{ЦЗО}=0}$	$K_{\text{ЦЗО}}$
A400	0,645	0,523
A500	0,594	0,490

Таблица 6

Обеспеченности ξ_R для бетона класса В30 до и после ЦЗО для арматуры класса А400 и А500

Класс арматуры	$K_{\text{ЦЗО}=0}$	$K_{\text{ЦЗО}}$
A400	0,0007481	0,000000
A500	0,001214	0,000000

Значение случайной величины предельного коэффициента армирования $\mu_{R,i}$ определялось по формуле (20):

$$\mu_{R,i} = \frac{N_{b,i}}{R_{s,i} \cdot b \cdot h_0} \quad (20)$$

где $N_{b,i}$ – случайное значение усилий в сжатом бетоне, определенном диаграммным методом, при случайных значениях деформаций $\varepsilon_{b2,i}$, $\varepsilon_{s,el,i}$ и призмной прочности $R_{b,i}$;

$R_{s,i}$ – случайное значение расчетного сопротивления арматуры.

Средние, нормативные и расчетные значения предельного коэффициента армирования μ_R для разных классов арматуры до и после воздействия ЦЗО определялись по формулам (21)-(23):

$$\mu_{R,cp} = \frac{\sum \mu_{R,i}}{n}, \quad (21)$$

$$\mu_{R,n} = (1 - 1,64 \cdot V) \cdot \mu_{R,cp}, \quad (22)$$

$$\mu_{R,p} = (1 - 3,00 \cdot V) \cdot \mu_{R,cp}, \quad (23)$$

Значения и кривые плотности распределения вероятности предельного коэффициента армирования μ_R для разных классов арматуры представлены в таблице 7 и на рис. 6. После воздействия ЦЗО все значения μ_R снижаются. Средние значения предельного коэффициента армирования μ_R , вычисленные вероятностным методом, до ЦЗО оказались немного больше, чем при расчете по нормам (СП 63). Нормативные и расчетные значения оказались значительно меньше значений, рекомендуемых нормами проектирования железобетонных конструкций. Воздействие ЦЗО приводит к значительному снижению значений коэффициентов предельного армирования μ_R .

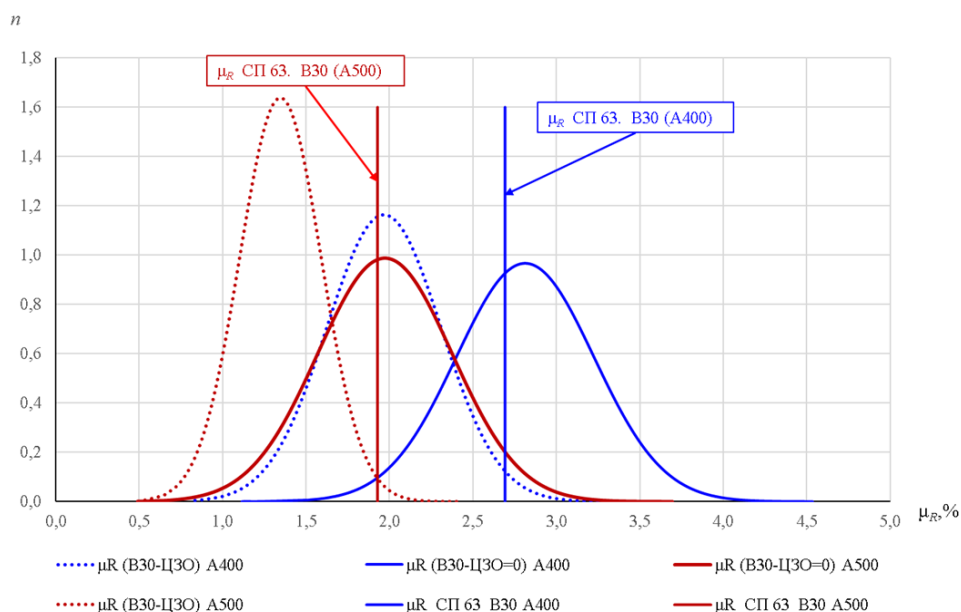


Рис. 6. – Кривые плотности распределения вероятности предельного коэффициента армирования μ_R для разных классов арматуры

Таблица 7

Средние, нормативные, расчетные значения предельного коэффициента армирования μ_R (%) и коэффициент вариации до и после ЦЗО для разных классов арматуры

	Класс бетона В30			
	А400		А500	
	ЦЗО = 0	ЦЗО	ЦЗО = 0	ЦЗО
$\mu_{R,ср}$	2,813	1,967	1,972	1,346
$V, \%$	14,67	17,43	20,48	18,49
$\mu_{R,n}$	2,136	1,404	1,310	0,947
$\mu_{R,p}$	1,575	0,938	0,761	0,615
μ_R СП63.	2,692		1,928	

Значения расчетных значений коэффициента обеспеченности предельного коэффициента армирования μ_R приведены в таблице 8. Для средних значений до воздействия ЦЗО коэффициент обеспеченности для арматуры класса А400 равен 1,05, а для арматуры класса А500 – 1,02. Для нормативных и расчетных величин значения коэффициента обеспеченности предельного коэффициента армирования μ_R значительно меньше единицы. Для арматуры класса А500 коэффициенты обеспеченности оказываются несколько меньше, чем для А400. Для расчетных величин для арматуры класса А400 коэффициент обеспеченности μ_R снизился после ЦЗО на 40,6%, а для арматуры класса А500 на 19,2%.

Величины обеспеченности μ_R для бетона класса В30 до и после ЦЗО для арматуры класса А400 и А500 представлены в таблице 9. Воздействия ЦЗО существенно снижает обеспеченность значений предельного коэффициента армирования μ_R , определенного по нормам проектирования (СП 63).

Таблица 8

Коэффициент обеспеченности μ_R для бетона класса В30 до и после ЦЗО для арматуры класса А400 и А500

Класс арматуры	$K_{ЦЗО=0}$	$K_{ЦЗО}$
A400	0,585	0,348
A500	0,395	0,319

Таблица 9

Обеспеченности μ_R для бетона класса В30 до и после ЦЗО для арматуры класса А400 и А500

Класс арматуры	$K_{ЦЗО=0}$	$K_{ЦЗО}$
A400	0,6149	0,0171
A500	0,5435	0,0084

Выводы

1. Выполнение требований федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» на стадии принятия проектных решений сопряжено с использованием нормативных положений, содержащих ряд условных предпосылок и ограничений, учитывающих специфику сопротивления конструктивных железобетонных элементов и упрощающих расчет.
2. Анализ статистических закономерностей используемых параметров и функциональных связей подтверждает их существенную изменчивость и, как следствие, вероятные колебания (снижение) проектного уровня надежности прочности изгибаемых железобетонных конструкций при высоких коэффициентах армирования.
3. Моделирование изменчивости конструктивных коэффициентов изгибаемых железобетонных элементов при ЦЗО с использованием статистически представительных данных кинетики физических и конструктивных параметров бетона подтверждает резкое снижение их

обеспеченности и указывает на необходимость дополнительных целенаправленных исследований в этом направлении.

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. Истомин А.Д., Назаров Т.А. Влияние природных циклов замораживания – оттаивания на прочность и деформативность бетона // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2019. № 3(381). С. 52-56.
4. Подвальный А.М. О концепции обеспечения морозостойкости бетона в конструкциях зданий и сооружений // Строительные материалы. 2004. № 6. С. 4-6.
5. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 1. С. 93-102.
6. Попов В.М., Герфанова О.А., Морозов В.И. Долговечность железобетонных конструкций // Бетон и железобетон - взгляд в будущее : Научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону (Москва, 12-16 мая 2014 года). Т. 3. М. : Изд-во Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, 2014. С. 356-366.

7. Истомин А.Д., Петрова В.А. Остаточные деформации бетона железобетонных элементов при циклическом замораживании и оттаивании // Строительство и реконструкция. 2022. № 3(101). С. 23-31.

8. 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.

9. Истомин А.Д., Александров Е.Н., Огурцова Л.П. Влияние способа водонасыщения бетона и отрицательной температуры на его деформативно-прочностные характеристики // Наука и техника в дорожной отрасли. 2018. № 4(86). С. 40-42.

10. Добшиц Л.М. Физико-математическая модель разрушения бетонов при попеременном замораживании и оттаивании // Жилищное строительство. 2017. № 12. С. 30-36.

11. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н. О построении диаграммного метода расчета стержневых железобетонных конструкций при отрицательных температурах // Полярная механика. 2016. № 3. С. 181-191.

12. Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н., Кадиев Д.З. К разработке и развитию физико-механического моделирования прочности и деформативности бетонов при воздействии низких (до минус 70 °С) отрицательных температур // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2018 году. Т. 2. М. : АСВ, 2019. С. 273-283.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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. Istomin A.D., Nazarov T.A. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. 2019. № 3(381). Pp. 52-56.
4. Podvalny A.M. Stroitel'nye materialy. 2004. № 6. Pp. 4-6.

5. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskiy V.N., Yerofeev V.T. Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. 2015. № 1. Pp. 93-102.
 6. Popov V.M., Gerfanova O.A., Morozov V.I. Beton i zhelezobeton - vzglyad v budushcheye. Nauchnyye trudy III Vserossiyskoy (II Mezhdunarodnoy) konferentsii po betonu i zhelezobetonu (Moskva, 12-16 maya 2014 goda). [Concrete and reinforced concrete - a look into the future. Scientific papers of the III All-Russian (II International) conference on concrete and reinforced concrete (Moscow, May 12-16, 2014)]. V. 3. M.: Izd-vo Natsional'nogo issledovatel'skogo Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta, 2014. Pp. 356-366.
 7. Istomin A.D., Petrova V.A. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2022. № 3(101). Pp. 23-31.
 8. Pinus B.I., Pinus Zh.N., Khomyakova I.V. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2015. № 2(97). Pp. 111-116.
 9. Istomin A.D., Aleksandrov Ye.N., Ogurtsova L.P. Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli. 2018. № 4(86). Pp. 40-42.
 10. Dobshits L.M. Zhilishchnoye stroitel'stvo. 2017. № 12. Pp. 30-36.
 11. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskiy V.N. Polyarnaya mekhanika. 2016. № 3. Pp. 181-191.
 12. Karpenko N.I., Yarmakovskiy V.N., Kadiev D.Z. Fundamental'nyye, poiskovyye i prikladnyye issledovaniya Rossiyskoy akademii arkhitektury i stroitel'nykh nauk po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noy otrasli Rossiyskoy Federatsii v 2018 godu. V. 2. M.: ASV, 2019. Pp. 273-283.
 13. Popov V.M., Plyusnin M.G. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2020. № 4(81). Pp. 80-88.
 14. Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I., Suxin D.P. Inzhenernyy vestnik Dona, 2021. №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/2021/7228.
-



15. 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.

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

17. Popov V.M., Pinus B.I., Plyusnin M.G., Kondratyeva L.N. Zhilishchnoye stroitel'stvo. 2025. № 1-2. Pp. 91-95.

18. Isaikin A.YA. Otsenka nadezhnosti staticheski neopredelimykh 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: 13.09.2025

Дата публикации: 25.10.2025