УДК 624.071

© М. Г. Плюснин, аспирант
(Костромская государственная сельскохозяйственная
академия, пос. Караваево,
Костромская область, Россия)
E-mail: apraiser3@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-57-67

© M. G. Plyusnin, post-graduate student
(Kostroma State Agricultural Academy,
Karavaevo, Kostroma region, Russia)
E-mail: apraiser3@yandex.ru

ОЦЕНКА ОБЕСПЕЧЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПО НОРМАЛЬНОМУ СЕЧЕНИЮ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЛИНЕЙНОЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ЦИКЛОВ ЗАМОРАЖИВАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ

EVALUATION OF THE SECURITY OF THE CALCULATION RESULTS OF THE LOAD-BEARING CAPACITY FOR THE NORMAL CROSS-SECTION OF ECCENTRICALLY COMPRESSED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS USING A NONLINEAR DEFORMATION MODEL UNDER THE ACTION OF FREEZING AND THAWING CYCLES

В результате численного моделирования с использованием вероятностного метода проведена оценка обеспеченности результатов расчета несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов с симметричным армированием по нормальному сечению с учетом воздействия циклов замораживания и оттаивания (ЦЗО). Распределения прочностных и деформационных характеристик бетона, используемые при вероятностном расчете, сформированы на основе результатов экспериментальных исследований. Показано, что обеспеченность результатов расчетов несущей способности при внецентренном сжатии по нелинейной деформационной модели в соответствии с действующими нормами зависит от эксцентриситета продольной силы и процента армирования. Снижение несущей способности по нормальному сечению для исследованных элементов при действии ЦЗО максимально при малых эксцентриситетах и не существенно при больших эксцентриситетах продольной силы, а также зависит от процента продольного армирования.

Ключевые слова: нелинейная деформационная модель, деформационные характеристики бетона, надежность железобетонных конструкций, внецентренно сжатый железобетонный элемент, коэффициент вариации, изменчивость характеристик, обеспеченность несущей способности, циклы замораживания и оттаивания.

As a result of numerical modeling using the probabilistic method, there has been estimated the security of the results of calculating the load-bearing capacity of eccentrically compressed reinforced concrete elements with symmetrical reinforcement along the normal cross-section, taking into account the effects of freezing and thawing cycles (FTC). The distributions of the strength and deformation concrete characteristics used in the probabilistic calculation are formed on the basis of the results of experimental studies. It is shown that the security of the results of calculations of the load-bearing capacity under eccentric compression according to the nonlinear deformation model in accordance with the current norms depends on the eccentricity of the longitudinal force and the reinforcement center. The author has substantiated that the decrease in the load-bearing capacity for the normal cross-section regarding the studied elements under the action of the FTC is maximal at small eccentricities and not significant at large eccentricities of the longitudinal force, and it depends on the percentage of longitudinal reinforcement.

Keywords: nonlinear deformation model, deformation characteristics of concrete, reliability of reinforced concrete structures, eccentrically compressed reinforced concrete element, coefficient of variation, characteristics variability, security of the bearing capacity, freezing and thawing cycles.

Введение

В соответствии с действующими нормами по расчету железобетонных конструкций основным методом определения прочности по нормальным сечениям изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов является нелинейная деформационная модель. Данный метод предполагает использование расчетных диаграмм σ – ϵ материалов (бетона и арматуры), которые сформированы на базе экспериментальных данных. Это позволяет учесть влияние не только прочностных, но и деформационных характеристик материалов и повысить достоверность расчетов. При расчетах на прочность работу бетона в растянутой зоне изгибаемых и внецентренно сжатых элементов не учитывают, так как вклад внутренних усилий, которые возникают в растянутом бетоне, в общую несущую способность незначителен. Форма расчетных диаграмм σ – ϵ бетона при сжатии определяется значениями его прочностных и деформационных характеристик. Прочностной характеристикой бетона является его расчетное сопротивление при сжатии R_b , а деформационными — начальный модуль упругости бетона E_b и предельные относительные деформации бетона при сжатии ϵ_{b0} . Расчетное сопротивление бетона, характеризующее его прочность, имеет обеспеченность, близкую к 100 %. А в качестве расчетных значений деформационных характеристик бетона используются их средние значения, обеспеченность которых равна 50 %. Совместное использование величин с разной обеспеченностью вносит дополнительную неопределенность в обеспеченность результатов расчетов прочности, особенно для элементов, имеющих арматуру в сжатой зоне бетона, так как максимальные напряжения в этой арматуре ограничиваются предельными деформациями сжатия бетона. Для большинства расчетных случаев расчетные диаграммы определяются с помощью прочностных и деформационных характеристик бетона, соответствующих кратковременному нагружению. Учет циклов замораживания и оттаивания (ЦЗО) в соответствии с действующими нормами осуществляют, используя понижающие коэффициенты к значениям расчетных значений прочностных и деформационных характеристик бетона. Значения данных коэффициентов в нормах не приведены.

В работах [1–9] показано, что деформационные характеристики бетона имеют статистическую изменчивость, которая сравнима с изменчивостью прочности бетона. По данным, приведенным в [9, 11], изменчивость деформационных характеристик бетона может оказывать влияние на обеспеченность результатов расчетов железобетонных элементов, особенно внецентренно сжатых, на прочность, а характер этого влияния зависит от процента армирования продольной арматуры. Анализ экспериментальных данных, приведенных в работе [12], показал, что между прочностными и деформационными характеристиками бетона имеется корреляционная связь, характер которой меняется при воздействии ЦЗО, что также будет оказывать влияние на характер статистического распределения несущей способности. Очевидно, что надежность железобетонных конструкций зависит от обеспеченности их несущей способности. Таким образом, исследование влияния параметров статистического распределения прочностных и деформационных характеристик бетона на статистическое распределение несущей способности железобетонных элементов является актуальным.

Исходя из этого, целью описываемого исследования является оценка обеспеченности несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов в зависимости от процента продольного армирования и циклов замораживания и оттаивания.

Материалы и методы

Оценка обеспеченности несущей способности внецентренно сжатого железобетонного элемента реализуется с помощью вероятностного расчета, результатом которого является вектор псевдослучайных значений максимальной продольной силы. Методика численного моделирования базируется на действующих нормах по расчету железобетонных конструкций (СП 63.13331.2018). Исходные данные формируются следующим образом: псевдослучайные распределения прочностных и деформационных характеристик бетона — на основе нормативных значений и результатов эксперимента, проведенного автором и описанного в работе [12]; псевдослучайные распределения прочностных и деформационных характеристик арматуры — на основе нормативных значений. Несущая способ-

ность по нормальному сечению рассчитывается для колонны с симметричным армированием. Размер сечения колонны 400×400 мм. Бетон класса В30, арматура класса А500. Предполагается, что эксцентриситет продольной силы изменяется вдоль оси симметрии сечения (плоское НДС). Арматурные стержни, расположенные у противоположных граней колонны (сжатой и растянутой или менее сжатой), при расчете рассматриваются совместно, их площадь суммируется. Процент армирования μ определяется как отношение площади всей арматуры к площади сечения элемента. Расстояние от центра тяжести сжатой и растянутой (менее сжатой) арматуры до ближайшей грани колонны составляет 50 мм. Для получения статистических характеристик результатов расчета несущей способности внецентренно сжатого железобетонного элемента по нормальному сечению используется метод статистических испытаний. Численное моделирование включает следующие этапы:

- формирование исходных данных, представляющих собой векторы из N псевдослучайных значений прочностных и деформационных характеристик бетона и арматуры;
- вычисление несущей способности внецентренно сжатого железобетонного элемента по нормальному сечению (максимальной продольной силы) с использованием нелинейной деформационной модели для каждого ($1...N$) набора исходных данных и формирование вектора из N значений максимальной продольной силы для различных значений процента армирования μ и эксцентриситета продольной силы e ;
- при вычислении несущей способности в качестве аналитической функции, аппроксимирующей диаграмму σ – ϵ бетона, используется формула ЕКБ-ФИП (формула Сарджина), диаграмма σ – ϵ арматуры принимается двухлинейной, значение максимальной деформации арматуры при сжатии ограничивается значением предельных деформаций бетона при сжатии;
- определение статистических характеристик распределения максимальной продольной силы для различных значений процента армирования μ и эксцентриситета продольной силы e .

Численный эксперимент базируется на следующих допущениях:

- геометрические характеристики модели (высота и ширина сечения колонны, рабочая высота сечения, диаметр арматуры и т. п.) принимаются детерминированными величинами, а прочностные и деформационные характеристики материалов — случайными величинами;
- предполагается, что значения прочностных и деформационных характеристик бетона и арматуры имеют нормальный закон распределения;
- статистические характеристики прочностных и деформационных характеристик арматуры принимаются в соответствии с нормативным документом (ГОСТ Р 52544–2006), прочность и модуль упругости арматуры считаются независимыми случайными величинами.

При расчете несущей способности по нелинейной деформационной модели использованы общие допущения данного метода, сформулированные в работе [14]:

- справедлива гипотеза плоских сечений (распределение деформаций по высоте сечения принимается линейным);
- арматура и бетон сохраняют полное сцепление и работают совместно вплоть до разрушения;
- все материалы сечения следуют своим диаграммам деформирования;
- расчет ведется итерационным методом, в качестве варьируемых переменных принимаются продольные относительные деформации крайних волокон ϵ_1 и ϵ_2 , выход из итераций осуществляется при достижении равновесия в сечении продольных усилий с заданной погрешностью либо при превышении заданного числа итераций, если равновесие при заданных параметрах невозможно.

Все вычисления сделаны в среде Mathcad. Количество реализаций случайной величины N принято равным 2000. Значение эксцентриситета варьировалось от 0,01 до 3,00 м. Величина процента армирования принималась равной 0,25, 0,50, 1,00, 2,00 и 3,00 %. Статистические характеристики псевдослучайных распределений исходных данных показаны в табл. 1 и 2. В столбце «Заданное значение» показана исходная величина параметра (принятая по нормам либо по результатам экспериментальных исследований) для формирования вектора псевдослучайных чисел, а в столбце «Фактическое значение» —

аналогичный параметр сформированного вектора исходных данных.

Фактические характеристики распределений близки к заданным, за исключением значений коэффициентов вариации деформационных характеристик бетона до ЦЗО. Это вызвано тем, что для формирования исходных данных использовался

нормативный коэффициент вариации прочности бетона, который больше значения, полученного в эксперименте. Пример гистограммы одного из полученных векторов значений несущей способности представлен на рис. 1. Дополнительно на рисунке показана теоретическая кривая нормального распределения со средним значением

Таблица 1

Статистические характеристики векторов псевдослучайных значений исходных данных до ЦЗО

№ п/п	Наименование параметра	Заданное значение	Фактическое значение
1	Среднее значение максимальных напряжений бетона при центральном сжатии, МПа	28,6	28,625
2	Коэффициент вариации прочности бетона при сжатии, %	13,5	13,4
3	Среднее значение предельных деформаций бетона при сжатии, ‰	2,00	1,999
4	Коэффициент линейной корреляции между прочностью бетона при центральном сжатии и предельными деформациями при центральном сжатии	0,574	0,546
5	Среднее значение начального модуля упругости бетона, ГПа	32,5	32,531
6	Коэффициент линейной корреляции между прочностью бетона при центральном сжатии и начальным модулем упругости	0,71	0,722
7	Среднее значение прочности арматуры 1, МПа	575	575,4
8	Коэффициент вариации прочности арматуры 1, %	8	8,1
9	Среднее значение прочности арматуры 2, МПа	575	575,3
10	Коэффициент вариации прочности арматуры 2, %	8	8
11	Среднее значение модуля упругости арматуры 1, ГПа	200	200,1
12	Коэффициент вариации модуля упругости арматуры 2, %	8	8
13	Среднее значение модуля упругости арматуры 2, ГПа	200	199,9
14	Коэффициент вариации модуля упругости арматуры 2, %	8	7,9
15	Коэффициент вариации начального модуля упругости бетона, %	6,62	8,9
16	Коэффициент вариации предельных деформаций бетона при центральном сжатии, %	4,82	7,8

Таблица 2

Статистические характеристики векторов псевдослучайных значений исходных данных после ЦЗО

№ п/п	Наименование параметра	Заданное значение	Фактическое значение
1	Среднее значение максимальных напряжений бетона при центральном сжатии, МПа	24,65	24,672
2	Коэффициент вариации прочности бетона при сжатии, %	13,5	13,4
3	Среднее значение предельных деформаций бетона при сжатии, ‰	1,72	1,725
4	Коэффициент линейной корреляции между прочностью бетона при центральном сжатии и предельными деформациями при центральном сжатии	0,261	0,252
5	Среднее значение начального модуля упругости бетона, ГПа	23,549	23,472
6	Коэффициент линейной корреляции между прочностью бетона при центральном сжатии и начальным модулем упругости	0,358	0,363
7	Коэффициент линейной корреляции между начальным модулем упругости и предельными деформациями при центральном сжатии	-0,778	-0,771
8	Коэффициент вариации начального модуля упругости бетона, %	16,3	13,04
9	Коэффициент вариации предельных деформаций бетона при сжатии, %	7,2	7,73

Рис. 1. Гистограмма вектора значений продольной силы и теоретическая кривая нормального распределения

и коэффициентом вариации для данного вектора значений несущей способности. По оси абсцисс откладывается значение продольной силы, а по оси ординат — вероятность реализации данного значения. Полученное распределение несущей способности близко к нормальному.

Результаты

Так как распределение несущей способности близко к нормальному, то оно с достаточной степенью точности может быть описано двумя величинами: средним значением и коэффициентом вариации. Эти величины были определены для каждого из полученных векторов значений продольной силы. Наибольший интерес представляет зависимость коэффициента вариации несущей способности от эксцентриситета, которая показана на рис. 2 (до ЦЗО) и рис. 3 (после ЦЗО). Для большей наглядности показаны графики только для минимального и максимального значений процента армирования. Остальные зависимости имеют аналогичную форму и находятся между показанными на рисунках кривыми. На графиках ясно прослеживаются две зоны: в области малых эксцентриситетов, где несущая способность обеспечивается в основном за счет бетона, коэффициент вариации максимален; зона, где с ростом эксцентриситета и снижением вклада бетона и ростом влияния арматуры на несущую способность коэффициент вариации резко снижается. Увеличение количества арматуры

приводит к более плавному изменению коэффициента вариации, но зависимость значения коэффициента вариации от эксцентриситета продольной силы остается.

Причина зависимости коэффициента вариации от эксцентриситета следующая. Как уже было сказано выше, при малых эксцентриситетах несущая способность обеспечивается в большей степени за счет сжатой зоны бетона, значения коэффициентов вариации прочностных и деформационных характеристик которого превышают значения аналогичных характеристик арматуры. Максимальные напряжения в сжатой арматуре пропорциональны предельным деформациям бетона, что также способствует увеличению коэффициента вариации несущей способности. С увеличением процента продольного армирования вклад бетона в несущую способность снижается, поэтому при $\mu = 0,25\%$ значение коэффициента вариации несущей способности выше, чем при $\mu = 3,00\%$. ЦЗО приводит к снижению средних значений прочностных и деформационных характеристик бетона. Соответственно, значения коэффициента вариации несущей способности рассматриваемого элемента после ЦЗО несколько снижаются. Наиболее сильно это проявляется при больших процентах армирования. Так как значение несущей способности с заданной обеспеченностью находится в зависимости от значения коэффициента ва-

Рис. 2. Зависимость коэффициента вариации несущей способности при внецентренном сжатии от относительного эксцентриситета до ЦЗО

Рис. 3. Зависимость коэффициента вариации несущей способности при внецентренном сжатии от относительного эксцентриситета после ЦЗО

риации, то обеспеченность несущей способности внецентренно сжатого железобетонного элемента по нормальному сечению будет зависеть от значения эксцентриситета продольной силы. Логично предположить, что расчетное значение

несущей способности должно иметь обеспеченность, аналогичную обеспеченности расчетного сопротивления бетона, которое составляет 0,9986 и соответствует трем стандартам случайной величины с нормальным распределением.

Так как применение вероятностных методов в повседневной практике расчета конструкций на прочность затруднительно ввиду их значительной трудоемкости, то особый интерес и практическую значимость представляет сопоставление результатов детерминированных расчетов с использованием расчетных значений характеристик материалов с результатами вероятностного расчета. Детерминированный и вероятностный расчеты выполняются по одинаковой методике. Для такого сопоставления в работе [13] был предложен показатель «коэффициент обеспеченности», который равен отношению значения несущей способности с заданной обеспеченностью, определенной вероятностным методом, к значению несущей способности, определенной детерминированным методом по расчетным значениям характеристик материалов. В случае близости значения данного коэффициента к единице результаты детерминированного расчета имеют необходимую обеспеченность.

Графики зависимости коэффициента обеспеченности несущей способности внецентренно сжатого железобетонного элемента от эксцентриситета продольной силы показаны на рис. 4 и 5. Как и следовало ожидать, в области малых эксцентриситетов коэффициент обеспеченности

имеет значение меньше единицы. То есть использование расчетных характеристик бетона в соответствии с нормами приводит к снижению обеспеченности несущей способности при малых эксцентриситетах ниже граничного значения 0,9986, которое соответствует трем стандартам. До ЦЗО при $\mu = 0,25$ % это снижение не существенно и не превышает 4 %. С увеличением количества продольной арматуры обеспеченность несущей способности уменьшается в большей степени и при $\mu = 3,00$ % достигает 12 %. С увеличением эксцентриситета значение коэффициента обеспеченности становится больше единицы.

При значениях относительного эксцентриситета более 3 при всех рассмотренных процентах армирования обеспеченность детерминированного расчета превышает граничную примерно на 4 %, то есть в области больших эксцентриситетов имеется некоторый запас несущей способности.

Графики коэффициента обеспеченности для несущей способности внецентренно сжатого элемента после ЦЗО имеют аналогичный вид. Отличием является только несколько большее снижение коэффициента обеспеченности в области малых эксцентриситетов для больших процентов армирования. При $\mu = 3,00$ % обеспеченность несущей способности меньше граничной

Рис. 4. Зависимость коэффициента обеспеченности несущей способности при внецентренном сжатии от относительного эксцентриситета до ЦЗО

Рис. 5. Зависимость коэффициента обеспечения несущей способности при внецентренном сжатии от относительного эксцентриситета после ЦЗО

уже почти на 15 %. То есть результаты расчета несущей способности внецентренно сжатого железобетонного элемента по нормальному сечению с использованием нелинейной деформационной модели имеют заниженную обеспеченность при малых эксцентриситетах, что может приводить к снижению надежности железобетонных конструкций. В то же время при больших эксцентриситетах имеется резерв надежности, используя который, возможно получить экономию материалов.

Для повышения обеспеченности результатов расчетов несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов по нормальному сечению с помощью нелинейной деформационной модели при малых эксцентриситетах необходимо уточнять методику расчета. Здесь, по мнению автора, возможно два основных пути: первый — это введение в расчет коэффициентов, учитывающих снижение обеспеченности несущей способности при малых эксцентриситетах, второй — уточнение расчетного значения предельных деформаций бетона. Первый вариант видится более сложным в практической реализации, так как значение коэффициента вариации несущей способности зависит не только от эксцентриситета, но и от процента армирования,

а также от соотношения прочностных характеристик бетона и арматуры. Второй вариант требует уточнения значения всего одного параметра — предельных деформаций бетона, так как на снижение обеспеченности результатов расчетов несущей способности в большей степени влияет их неучтенная изменчивость. Однако для этого требуется проведение большого объема экспериментальных исследований.

На рис. 6 показана зависимость относительного снижения расчетной несущей способности при ЦЗО, определенная с помощью вероятностного метода. Наиболее сильно деградация бетона, вызванная ЦЗО, проявляется при малых эксцентриситетах. Снижение несущей способности при $\mu = 0,25$ % достигает 14 %. При увеличении эксцентриситета влияние ЦЗО на несущую способность значительно снижается. Увеличение количества продольной арматуры несколько уменьшает влияние ЦЗО на несущую способность в области малых эксцентриситетов (около 5 %) и незначительно (около 1 %) — увеличивает в области больших эксцентриситетов продольной силы.

Выводы

Расчеты, проведенные на основе экспериментальных данных об изменчивости дефор-

Рис. 6. График относительного снижения несущей способности при внецентренном сжатии от относительного эксцентриситета после ЦЗО

мационных характеристик бетона, подтвердили зависимость значения коэффициента вариации несущей способности внецентренно сжатого железобетонного элемента с симметричным армированием от значения эксцентриситета продольной силы. При малых процентах армирования отличие значений коэффициента вариации при малых и больших эксцентриситетах достигает 100 %. Увеличение количества продольной арматуры несколько сглаживает проявление данного эффекта.

Обеспеченность результатов расчетов несущей способности внецентренно сжатого железобетонного элемента с симметричным армированием по нелинейной деформационной модели при использовании расчетных значений прочностных и деформационных характеристик в соответствии с действующими нормами также является функцией эксцентриситета продольной силы. При малых эксцентриситетах обеспеченность несущей способности меньше граничного значения, а при больших эксцентриситетах превышает его. Соответственно, надежность результатов расчетов, как и их обеспеченность, зависит от значения эксцентриситета продольной силы.

Наиболее простым путем достижения необходимой обеспеченности результатов расчетов несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов является уточнение расчетных значений предельных деформаций бетона при сжатии.

Влияние ЦЗО на несущую способность внецентренно сжатого железобетонного элемента с симметричным армированием по нормальному сечению наиболее сильно проявляется при малых эксцентриситетах продольной силы. Увеличение количества продольной арматуры снижает воздействие ЦЗО на несущую способность. Снижение максимальной продольной силы при больших эксцентриситетах несущественно и может не учитываться при расчетах.

Библиографический список

1. Yan X., Ren X., Li J. Experimental study of full process variability of concrete under uniaxial compression // *Tongji Daxue Xuebao/Journal of Tongji University*. 2016. № 44 (5). Pp. 664–670. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2016.05.002.
2. Пинус Б. И., Пинус Ж. Н., Хомякова И. В. Изменение конструктивных свойств бетонов при охлаждении и замораживании // *Вестник Иркутского гос. техн. ун-та*. 2015. № 2 (97). С. 111–116.

3. Свиридов Н. В., Хирнов В. В. Особенности нормирования показателей качества бетонов высокой прочности // Технологии бетонов. 2015. № 7–8 (108–109). С. 54–61.

4. Xiao Li, Zhi Shan, Zhiwu Yu, Jing Gao, Jianfeng Mao. Stochastic Constitutive Relationship of Self-Compacting Concrete under Uniaxial Compression // *Advances in Civil Engineering*. 2018. Vol. 12. Article ID 3157414. Pp. 1–14. <https://doi.org/10.1155/2018/3157414>.

5. Xiao J., Zhang K., Akbarnezhad A. Variability of stress-strain relationship for recycled aggregate concrete under uniaxial compression loading // *Journal of Cleaner Production*. 20 April 2018. Vol. 181. Pp. 753–771. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.247>.

6. Peng Chen, Changyong Liu, Yuyin Wang. Size effect on peak axial strain and stress-strain behavior of concrete subjected to axial compression // *Construction and Building Materials*. 10 November 2018. Vol. 188. Pp. 645–655. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.072>.

7. Жарницкий В. И., Беликов А. А. Квазистатические испытания бетонных и армированных призм с целью изучения полных диаграмм сопротивления // «Бетон и железобетон — взгляд в будущее»: науч. тр. III Всерос. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону: в 7 т. М.: Нац. исслед. Московский гос. строит. ун-т, 2014. Т. 1. С. 39–48.

8. Безогодов И. М., Дмитренко Е. Н., Начарова А. Н. Регулирование деформационных свойств бетона // Технологии бетонов. 2018. № 11–12 (148–149). С. 50–52.

9. Попов В. М., Герфанова О. А., Морозов В. И. Долговечность железобетонных конструкций // «Бетон и железобетон — взгляд в будущее»: науч. тр. III Всерос. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону: в 7 т. М.: Нац. исслед. Московский гос. строит. ун-т, 2014. Т. 3. С. 356–366.

10. Попов В. М., Плюснин М. Г. Влияние деформационных характеристик бетона на несущую способность внецентренно сжатых железобетонных элементов // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 3 (56). С. 83–88.

11. Плюснин М. Г., Морозов В. И., Попов В. М., Савин С. Н., Смирнова Е. Э. Оценка влияния эксцентриситета продольной силы на обеспеченность несущей способности сжатых железобетонных элементов // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 6. С. 29–34.

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

13. Исайкин А. Я. Оценка надежности статически неопределимых железобетонных конструкций на

основе метода предельного равновесия: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2000. 405 с.

14. Попов В. М., Хомякова И. В. Учет уровня армирования на прочность изгибаемых железобетонных элементов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Региональное приложение «Якутия». 2006. Вып. 1. С. 215–217.

References

1. Yan X., Ren X., Li J. Experimental study of full process variability of concrete under uniaxial compression. *Journal of Tongji University*, 2016, no. 44 (5), pp. 664–670. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2016.05.002

2. Pinus B. I., Pinus Zh. N., Khomyakova I. V. *Izmenenie konstruktivnykh svoystv betonov pri okhlazhdenii i zamorazhivanii* [Changes in the structural properties of concrete during cooling and freezing]. *Vestnik Irkutskogo gos. tekhn. un-ta – Bulletin of the Irkutsk State Technical University*, 2015, no. 2 (97), pp. 111–116.

3. Sviridov N. V., Khirnov V. V. *Osobennosti normirovaniya pokazateley kachestva betonov vysokoy prochnosti* [Features of normalization of quality indicators of high-strength concrete]. *Tekhnologii betonov – Technologies of concrete*, 2015, no. 7–8 (108–109), pp. 54–61.

4. Xiao Li, et al. Stochastic constitutive relationship of self-compacting concrete under uniaxial compression. *Advances in Civil Engineering*, 2018, vol. 12, Article ID 3157414, pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.1155/2018/3157414>

5. Xiao J., Zhang K., Akbarnezhad A. Variability of stress-strain relationship for recycle aggregate concrete under uniaxial compression loading. *Journal of Cleaner Production*, 20 April 2018, vol. 181, pp. 753–771. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.247>.

6. Peng Chen, Changyong Liu, Yuyin Wang. Size effect on peak axial strain and stress-strain behavior of concrete subjected to axial compression. *Construction and Building Materials*, 10 November 2018, Vol. 188, pp. 645–655. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.072>.

7. Zharnitskiy V. I., Belikov A. A. *Kvazistaticheskie ispytaniya betonnykh i armirovannykh prizm s tsel'yu izucheniya polnykh diagramm soprotivleniya* [Quasi-static tests of concrete and reinforced prisms for the purpose of studying complete resistance diagrams]. *Trudy III Vseros. (II Mezhdunar.) konf. po betonu i zhelezobetonu «Beton i zhelezobeton — vzglyad v budushchee»* [Proceedings of the III All-Russia (II International) conf. on concrete and reinforced concrete “Concrete and reinforced concrete a look into the future”]. In 7 vols. Moscow, Nats. issled. Moskovskiy gos. stroit. un-t Publ., 2014, vol. 1, pp. 39–48.

8. Bezgodov I. M., Dmitrenko E. N., Nacharova A. N. *Regulirovanie deformatsionnykh svoystv betona* [Regulation

of deformation properties of concrete]. *Tekhnologii betonov – Technologies of concrete*, 2018, no. 11–12 (148–149), pp. 50–52.

9. Popov V. M., Gerfanova O. A., Morozov V. I. *Dolgovechnost' zhelezobetonnykh konstruktsey* [Durability of reinforced concrete structures]. *Trudy III Vseros. (II Mezhdunar.) konf. po betonu i zhelezobetonu «Beton i zhelezobeton — vzglyad v budushchee»* [Proceedings of the III All-Russia (II International) conf. on concrete and reinforced concrete “Concrete and reinforced concrete a look into the future”]. In 7 vols. Moscow, Nats. issled. Moskovskiy gos. stroit. un-t Publ., 2014, vol. 3, pp. 356–366.

10. Popov V. M., Plyusnin M. G. *Vliyanie deformatsionnykh kharakteristik betona na nesushchuyu sposobnost' vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov* [The influence of concrete strain characteristics on the bearing capacity of eccentrically compressed reinforced concrete elements]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 3 (56), pp. 83–88.

11. Plyusnin M. G., et al. *Otsenka vliyaniya ekstsentrisiteta prodol'noy sily na obespechennost' nesushchey sposobnosti szhatykh zhelezobetonnykh elementov* [Evaluation of the influence of the eccentricity of the longitudinal force on the security of the bearing

capacity of compressed reinforced concrete elements]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil construction*, 2019, no. 6, pp. 29–34.

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

13. Isaykin A. Ya. *Otsenka nadezhnosti staticheskoi neopredelimykh zhelezobetonnykh konstruktsey na osnove metoda predelnogo ravnovesiya*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Evaluation of the reliability of statically indeterminate reinforced concrete structures based on the limit equilibrium method. Dr. Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2000, 405 p.

14. Popov V. M., Khomyakova I. V. *Uchet urovnya armirovaniya na prochnost' izгибаемых zhelezobetonnykh elementov* [Accounting the level of reinforcement for the strength of bent reinforced concrete elements]. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. Regional'noe prilozhenie «Yakutiya» – Mining Information and Analysis Bulletin. Regional application “Yakutia”*, 2006, iss. 1, pp. 215–217.