УДК 624.071

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

© Ю. В. Пухаренко, д-р техн. наук, профессор

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: popov_vladimir_m@mail.ru

© М. Г. Плюснин, аспирант

(Костромская государственная сельскохозяйственная
академия, пос. Караваево, Костромская область, Россия)

E-mail: apraiser3@yandex.ru

© В. В. Белов, д-р техн. наук, доцент

(АО «Атомэнергопроект», Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: vvblov@atomproekt.com

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-6-42-50

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

© Yu. V. Pukharensko, Dr. Sci. Tech., Professor

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: popov_vladimir_m@mail.ru

© M. G. Plusnin, post-graduate student

(Kostroma State Agricultural Academy, Karavaevo,
Kostroma region, Russia)

E-mail: apraiser3@yandex.ru

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

(JSC «Atomenergoproekt», St. Petersburg, Russia)

E-mail: vvblov@atomproekt.com

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗНАЧЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ БЕТОНА ПРИ СЖАТИИ НА ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА ПО НОРМАЛЬНОМУ СЕЧЕНИЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЛИНЕЙНОЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE MAXIMUM DEFORMATION VALUE OF CONCRETE UNDER COMPRESSION ON THE SECURITY OF THE RESULTS OF CALCULATING THE STRENGTH OF ECCENTRICALLY COMPRESSED REINFORCED CONCRETE ELEMENT WITH A NORMAL CROSS-SECTION USING A NONLINEAR DEFORMATION MODEL

В результате расчетов в вероятностной постановке показано, что обеспеченность результатов расчета несущей способности железобетонных элементов с симметричным армированием при внецентренном сжатии зависит от эксцентриситета продольной силы и количества продольной арматуры. Для повышения обеспеченности результатов расчета несущей способности внецентренно сжатого железобетонного элемента по нормальному сечению в области малых эксцентриситетов предлагается снизить расчетное значение предельных деформаций бетона при сжатии. Анализ влияния величины расчетного значения предельных деформаций бетона при сжатии на результаты расчета прочности внецентренно сжатого железобетонного элемента по нормальному сечению показал, что снижение расчетного значения предельных деформаций бетона при сжатии на 15 % с 2,00 ‰ до 1,7 ‰ позволяет увеличить обеспеченность результатов расчета несущей способности в области малых эксцентриситетов. При этом обеспеченность результатов расчета несущей способности при больших эксцентриситетах практически не меняется. Для принятия решения об оптимальном расчетном значении предельных деформаций бетона при сжатии необходимо проведение большого объема экспериментальных исследований для уточнения характеристик их статистического распределения.

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

As a result of calculations in the probabilistic formulation, it is shown that the security of the results of calculating the load-bearing capacity of reinforced concrete elements with symmetric reinforcement under eccentric compression depends on the eccentricity of the longitudinal force and the quantity of longitudinal reinforcement. To increase the security of the results of calculating the load-bearing capacity of a eccentrically

compressed reinforced concrete element with a normal cross-section in the area of small eccentricities, it is proposed to reduce the calculated value of the maximum deformation of concrete under compression. The analysis of the influence of the calculated value of the maximum deformations of concrete under compression on the results of calculating the strength of an eccentrically compressed reinforced concrete element with a normal cross-section has shown that reducing the calculated value of the maximum deformations of concrete under compression by 15% from 2.00% to 1.7% increases the security of the results of calculating the load-bearing capacity in the area of small eccentricities. At the same time, the security of the results of the calculation of the load-bearing capacity at large eccentricities practically does not change. To make a decision on the optimal design value of the maximum concrete deformations under compression, it is necessary to carry out a large amount of experimental studies to specify the characteristics of their statistical distribution.

Keywords: nonlinear deformation model, deformation characteristics of concrete, reliability of reinforced concrete structures, eccentrically compressed reinforced concrete element, coefficient of variation, variability of characteristics, bearing capacity provision.

Введение

Обеспечение надежности и долговечности строительных конструкций является главной задачей, решаемой при их проектировании и расчете. В рамках метода предельных состояний эта задача решается за счет использования при расчетах значений нагрузок и прочностных характеристик материалов с необходимой обеспеченностью и учета различных случайных факторов, влияющих на надежность, при помощи соответствующих коэффициентов. Надежность строительной конструкции зависит от обеспеченности несущей способности ее элементов, под которой понимается вероятность того, что фактическое значение несущей способности будет не меньше значения несущей способности, полученного при расчете. В свою очередь, обеспеченность результата расчета несущей способности элемента железобетонной конструкции является функцией множества случайных факторов, основными из которых считаются значения прочностных и деформационных характеристик материалов, геометрических параметров конструкции (площадь сечения, толщина защитного слоя, диаметр арматуры и т. д.).

В настоящее время при использовании для расчетов несущей способности железобетонных элементов по нормальным сечениям все чаще используются диаграммные методы (нелинейная деформационная модель). При этом, в соответствии с действующими нормами, прочностные и деформационные характеристики материалов, которые являются исходными данными, имеют разную обеспеченность. Расчетные сопротивления бетона и арматуры имеют обеспеченность 99,86 %, а в качестве расчетных значений началь-

ного модуля упругости и предельных деформаций материалов принимаются средние значения этих случайных величин. В опубликованных результатах некоторых исследований [1–9, 12] показано, что дисперсии деформационных характеристик бетона и его прочности имеют схожие значения. В работах [1, 9–11] исследовано влияние изменчивости деформационных характеристик бетона, в особенности значения предельных деформаций при сжатии, на дисперсию результатов расчета железобетонных элементов на прочность по нормальному сечению, особенно при внецентренном сжатии. Значение коэффициента вариации несущей способности железобетонного элемента с симметричным армированием по нормальному сечению при малых эксцентриситетах продольной силы превышает значение этой величины при больших эксцентриситетах в 1,5–1,9 раза. Соответственно обеспеченность результата расчета несущей способности железобетонного элемента с симметричным армированием по нормальному сечению также будет изменяться в зависимости от величины эксцентриситета продольной силы и количества продольной арматуры. В связи с изложенным представляет интерес оценка влияния значения предельных деформаций бетона при сжатии на обеспеченность результатов расчета прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов с использованием диаграммного метода и расчетных значений прочностных и деформационных характеристик материалов в соответствии с действующими нормами (СП 63.13330.2018).

Материалы и методы

В качестве объекта исследования принята колонна с симметричным армированием размером

сечения 400×400 мм, бетон класса В30, продольная арматура класса А500. На описываемом этапе исследования зависимость гибкости от процента армирования и влияние гибкости колонны на минимальный процент армирования и несущую способность не рассматривались, так как согласно методике, изложенной в СП 63.13330.2018, при определении значения коэффициента снижения несущей способности за счет прогиба η значения предельных деформаций бетона ϵ_{bo} не используются. Оценка влияния значения предельных деформаций бетона при сжатии на обеспеченность результатов расчета прочности внецентренно сжатого железобетонного элемента проводится в предположении нормального распределения исходных данных и включает несколько этапов.

На первом этапе с использованием нелинейной деформационной модели и расчетных значений прочностных и деформационных характеристик материалов в соответствии с СП 63.13330.2018 определяется несущая способность внецентренно сжатого железобетонного элемента по нормальному сечению (детерминированный расчет). Значение эксцентриситета продольной силы относительно продольной оси колонны варьируется от 0,01 до 3,00 м. Процент армирования принимает значения 0,25, 0,50, 1,00, 2,00 и 3,00 %.

Далее с использованием параметров статистических распределений прочностных и деформационных характеристик бетона, полученных в результате эксперимента [12], проводится расчет несущей способности при внецентренном сжатии в вероятностной постановке при тех же значениях эксцентриситета. Для этого используется метод статистических испытаний, вычисления выполнены по методике, изложенной в работе [14]. По полученным характеристикам распределения несущей способности (среднее значение и коэффициент вариации) определяется значение прочности с обеспеченностью 99,86 %, которое принимается в качестве граничного значения.

Затем для оценки обеспеченности результатов детерминированного расчета рассчитывается коэффициент обеспеченности ($K_{об}$), равный отношению значения несущей способности с заданной обеспеченностью, определенной вероятностным методом, к значению несущей способности, определенной детерминированным мето-

дом по расчетным значениям характеристик материалов [13]. При равенстве значений несущих способностей, определенных вероятностным и детерминированным методом, $K_{об} = 1$. При $K_{об} < 1$ обеспеченность результата детерминированного расчета меньше 99,86 %, а при $K_{об} > 1$, соответственно, больше.

На следующем этапе проводится оценка влияния значения предельных деформаций бетона при сжатии на результат расчета прочности внецентренно сжатого железобетонного элемента по нормальному сечению. Для этого выполняются вычисления, аналогичные проведенным на первом этапе, но с дополнительным варьированием значения предельных деформаций бетона в диапазоне $(0,7 \dots 0,95)\epsilon_{bon}$, где $\epsilon_{bon} = 2$ ‰. Диапазон изменения предельных деформаций принят исходя из их изменчивости по результатам эксперимента [12].

На последнем этапе собственно оценивается влияние значения предельных деформаций бетона при сжатии на обеспеченность результатов расчета прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов. Для этого были рассчитаны значения коэффициента обеспеченности несущей способности при изменении значения предельных деформаций бетона в указанном выше диапазоне и проведен их анализ.

Результаты

Зависимости коэффициента обеспеченности результатов расчета несущей способности при внецентренном сжатии от относительного эксцентриситета продольной силы приведены на рис. 1. 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. 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 принимается равным обеспеченности расчетных сопротивлений бетона и арматуры. При нормальном законе распределения случайной величины ее значение с указанной обеспеченностью опреде-

Рис. 1. Зависимость коэффициента обеспеченности несущей способности при внецентренном сжатии от относительного эксцентриситета

ляется как разность среднего значения и утроенного среднего квадратического отклонения (стандарта) этой случайной величины. При $\mu = 0,25\%$ это снижение несущественно 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.

Таким образом, 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. Одной из причин этого эффекта является изменчивость предельных деформаций бетона, которая не учитывается при назначении их расчетного значения.

Как было сказано выше, при оценке влияния значения предельных деформаций бетона при

сжатии на результат расчета прочности внецентренно сжатого железобетонного элемента по нормальному сечению значение предельных деформаций варьировалось в диапазоне $(0,7 \dots 0,95) \varepsilon_{b0n}$. Существенное (более 5 %) снижение результата расчета несущей способности происходит при $\varepsilon_{b0} = 0,85 \varepsilon_{b0n}$ и ниже. На рис. 2 показана зависимость отношения значения несущей способности при $\varepsilon_{b0} = 0,7 \varepsilon_{b0n} (N)$ к значению несущей способности при $\varepsilon_{b0} = \varepsilon_{b0n} (N_n)$, а на рис. 3 — аналогичная зависимость при $\varepsilon_{b0} = 0,85 \varepsilon_{b0n} (N)$ к значению несущей способности при $\varepsilon_{b0} = \varepsilon_{b0n} (N_n)$. Кривые для промежуточных значений $\varepsilon_{b0} = 0,75 \varepsilon_{b0n}$ и $\varepsilon_{b0} = 0,8 \varepsilon_{b0n}$ имеют аналогичный вид и расположены между показанными на рис. 2 и 3 зависимостями для соответствующих процентов армирования.

На рисунках показаны кривые для максимального и минимального значений из рассмотренных процентов армирования. Остальные зависимости находятся между показанными на рисунках кривыми. При небольших процентах продольного армирования значение предельных деформаций бетона практически не влияет на результаты расчета несущей способности при внецентренном сжатии. При $\mu = 0,25\%$ снижение результатов расчета несущей способности при уменьшении значения предельных деформаций бетона при сжатии на 30 % (до $0,7 \varepsilon_{b0n}$) не превы-

шает 2 %. Следовательно, на изменение коэффициента обеспеченности при данном проценте армирования (см. рис. 1) оказывают влияние и другие факторы, не рассматриваемые в настоящем исследовании. С увеличением продольного армирования влияние значения предельных деформаций бетона на результат расчета несущей способности становится заметным. При $\mu = 3,00$ % снижение результата расчета макси-

мальной продольной силы достигает 17 %. С увеличением эксцентриситета продольной силы влияние значения предельных деформаций бетона на результат расчета несущей способности при внецентренном сжатии снижается.

Графики для $\mu = 3,00$ %, приведенные на рис. 2 и 3, схожи с графиками зависимости коэффициента обеспеченности от эксцентриситета, показанными на рис. 1. Снижение результатов

Рис. 2. Зависимость изменения результата расчета несущей способности при внецентренном сжатии от относительного эксцентриситета при $\epsilon_{b0}/\epsilon_{b0n} = 0,7$

Рис. 3. Зависимость изменения результата расчета несущей способности при внецентренном сжатии от относительного эксцентриситета при $\epsilon_{b0}/\epsilon_{b0n} = 0,85$

расчета несущей способности наблюдается в области малых эксцентриситетов, там, где значение коэффициента обеспеченности (см. рис. 1) также снижается. Уменьшение ϵ_{b0} ниже $0,85\epsilon_{b0n}$ нецелесообразно, так как приведет к излишнему занижению несущей способности. Таким образом, снижение расчетного значения предельных деформаций бетона при сжатии на 15 % до 1,7 ‰ позволяет приблизить результаты детерминированного расчета по нелинейной деформационной модели к результатам расчета несущей способности с обеспеченностью 0,9986 при внецентренном сжатии в вероятностной постановке. На рис. 4 показаны зависимости коэффициента обеспеченности несущей способности при внецентренном сжатии от относительного эксцентриситета при $\epsilon_{b0} = 1,7 ‰$ (черным цветом) и при $\epsilon_{b0} = 2,0 ‰$ (серым цветом).

Снижение расчетного значения предельных деформаций бетона при сжатии на 15 % до 1,7 ‰ практически не повлияло на обеспеченность результатов расчета несущей способности при внецентренном сжатии при $\mu = 0,25 ‰$. Отличие кривых заметно лишь при малых эксцентриситетах и не превышает 2 %. В то же время за счет снижения значения предельных деформаций бетона минимальная обеспеченность результатов

расчетов в зоне малых эксцентриситетов при $\mu = 3,00 ‰$ увеличилась на 7 %. При этом обеспеченность результатов расчета несущей способности для больших эксцентриситетов продольной силы существенно не изменилась (рост составил не более 1 %).

Снижение расчетного значения предельных деформаций бетона позволило частично компенсировать влияние изменения эксцентриситета продольной силы на обеспеченность результатов расчета несущей способности по нелинейной деформационной модели. При $\epsilon_{b0} = 1,7 ‰$ и $\mu = 3,00 ‰$ значение коэффициента обеспеченности находится в диапазоне 0,93...1,06 (см. рис. 4). Для нормативного значения предельных деформаций бетона при сжатии $\epsilon_{b0} = 2,0 ‰$ и $\mu = 3,00 ‰$ диапазон изменения коэффициента обеспеченности составил 0,85...1,03. Таким образом, уменьшение величины расчетного значения предельных деформаций бетона при сжатии относительно ее нормативной величины оказывает положительное влияние на уровень обеспеченности результатов расчета несущей способности по нормальным сечениям при внецентренном сжатии.

Рис. 4. Зависимость коэффициента обеспеченности несущей способности при внецентренном сжатии от относительного эксцентриситета при $\epsilon_{b0} = 1,7 ‰$ и $\epsilon_{b0} = 2,0 ‰$

Выводы

В результате проведенного анализа влияния значения предельных деформаций бетона при сжатии на результаты расчетов несущей способности по нормальному сечению с использованием нелинейной деформационной модели определено, что значения предельных деформаций бетона при сжатии существенно влияют на результаты расчетов на прочность при малых эксцентриситетах продольной силы и больших процентах армирования и практически не оказывают влияния на результаты расчета при больших эксцентриситетах и малых процентах армирования. Повышенная чувствительность результатов расчета к величине предельных деформаций бетона ϵ_{b0} при малых эксцентриситетах вызвана тем, что в этом случае вклад сжатой зоны бетона и сжатой арматуры в несущую способность железобетонного элемента по нормальному сечению наиболее заметен. С увеличением площади сжатой арматуры, максимальные напряжения в которой пропорциональны значению ϵ_{b0} , его влияние на несущую способность возрастает. Таким образом, оптимальным способом повышения обеспеченности результатов расчетов на прочность по нормальному сечению при внецентренном сжатии будет корректировка (снижение) расчетного значения предельных деформаций бетона при сжатии.

Уменьшение значения предельных деформаций бетона при сжатии до 1,7 ‰, что составляет 85 % от нормативного значения (в этом случае значение коэффициента надежности предельных деформаций равно отношению $2,0/1,7 \approx 1,2$), позволило сгладить влияние эксцентриситета продольной силы на коэффициент обеспеченности несущей способности по нормальному сечению при внецентренном сжатии и повысить обеспеченность результатов расчетов при малых эксцентриситетах. При указанном значении ϵ_{b0} диапазон изменения коэффициента обеспеченности составил 0,93...1,06, в то время как при $\epsilon_{b0} = 2,0$ ‰ значение коэффициента обеспеченности менялось в диапазоне 0,85...1,03.

Оценка обеспеченности результатов расчета несущей способности внецентренно сжатого железобетонного элемента по нормальному сечению выполнена исходя из ограниченного объема экспериментальных данных. Для принятия

решения об оптимальном расчетном значении предельных деформаций бетона при сжатии и, соответственно, значении коэффициента надежности, позволяющего перейти от нормативного к расчетному значению, необходимо проведение большого объема экспериментальных исследований для уточнения характеристик статистического распределения этих деформаций.

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. Batoma Sossoa, Sarah da Silva Andradeb, Luiz C. M. Vieira Jr.b, Péter Z. Berkeá. Probabilistic modelling of the robustness of reinforced concrete frames accounting for material property variability using a layered beam finite element approach // *Engineering Failure Analysis*. 2020. December. Vol. 118. 104789. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104789>.
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. URL: <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. URL: <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. URL: <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. Безгодов 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. 2014. 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. Плюснин М. Г., Бахчев В. В., Поддубная Е. В., Смирнов А. В. Вероятностный расчёт внецентренно сжатого железобетонного элемента на прочность по нормальному сечению // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: сб. статей 70-й междунар. науч.-практ. конф. (Караваево, 17 января 2019 г.). В 3 т. / под ред. С. В. Цыбакина, С. А. Полозова, А. В. Рожнова. Караваево: Костромская гос. сельхоз. академия. 2019. С. 36–39.

References

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, no. 44 (5), pp. 664–670. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2016.05.002.

2. Batoma Sossoa, et al. Probabilistic modeling of the robustness of reinforced concrete frames accounting for material property variability using a layered beam finite element approach. *Engineering Failure Analysis*, 2020, December, vol. 118, pp. 104789. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104789>

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

4. XiaoLi, 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 recycled 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. Kvizistaticheskie ispytaniya betonnykh i armirovannykh prizm s tselyu izucheniya polnykh diagramm soprotivleniya [Quasi-static tests of concrete and reinforced prisms in order to study complete resistance diagrams]. *Trudy III Vseros. (II Mezhdunar.) konf. po betonu i zhelezobetonu «Beton i zhelezobeton — vzglyad v budushchee»* [Proceedings of the 3-rd 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 konstruktсий [Durability of reinforced concrete structures]. *Trudy III Vseros. (II Mezhdunar.) konf. po betonu i zhelezobetonu «Beton i zhelezobeton — vzglyad v budushchee»* [Proceedings of the 3-rd 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 eksstsentrisiteta prodol'noy sily na obespechennost' nesushchey sposobnosti szhatykh zhelezobetonnykh elementov [Evaluation of the effect 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 staticheski neopredelimykh zhelezobetonnykh konstruktsiy na osnove metoda predelnogo ravnovesiya. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Assessment of the reliability of statically indeterminate reinforced concrete structures based on the limit equilibrium method. Dr. Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2000, 405 p.

14. Plyusnin M. G., Bakhchev V. V., Poddubnaya E. V., Smirnov A. V. *Veroyatnostniy raschyot vnetsentrenno szhatogo zhelezobetonного elementa na prochnost' po normal'nomu secheniyu* [Probabilistic calculation of eccentrically compressed reinforced concrete element for strength in normal cross-section]. *Trudy 70-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Karavaevo, 17 yanvarya 2019 g.) «Aktual'nye problemy nauki v agropromyshlennom komplekse»* [Proceedings of the 70-th International scientific and practical conference (Karavaevo, January 17, 2019) "Actual problems of science in the agro-industrial complex"]. In 3 vols. Ed. by Tsybakin S. V., Polozov S. A., Rozhnov A. V. Karavaevo, Kostromskaya gos. sel'khoz. Akademiya Publ., 2019, pp. 36–39.