УДК 624.071

© В. М. Попов, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: popov_vladimir_m@mail.ru

© М. Г. Плюснин, аспирант
(Костромская государственная сельскохозяйственная
академия, г. Кострома, Россия)

E-mail: apraiser3@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-4-80-88

© V. M. Popov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: popov_vladimir_m@mail.ru

© M. G. Plyusnin, post-graduate student
(Kostroma State Agricultural Academy,
Kostroma, Russia)

E-mail: apraiser3@yandex.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГРАММ $\sigma - \epsilon$ БЕТОНА ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ И ВЛИЯНИЯ НА ИХ ФОРМУ ЦИКЛОВ ЗАМОРАЖИВАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ

EXPERIMENTAL STUDY OF $\sigma - \epsilon$ DIAGRAMS OF CONCRETE UNDER UNIAXIAL COMPRESSION AND THE INFLUENCE OF FREEZING AND THAWING CYCLES ON THE FORM OF THE DIAGRAMS

В результате экспериментального исследования проведена оценка изменчивости формы полных диаграмм $\sigma - \epsilon$ бетона при одноосном сжатии. Показано, что в рамках одного класса бетона по прочности при сжатии коэффициенты вариации деформационных характеристик бетона сопоставимы с коэффициентом вариации прочности. Установлено, что воздействие циклов замораживания и оттаивания приводит не только к снижению прочности бетона при сжатии, но и к уменьшению предельных деформаций при кратковременном действии нагрузки и начального модуля упругости. При использовании диаграммных методов расчета железобетонных конструкций необходимо учитывать влияние изменчивости не только прочностных, но и деформационных характеристик бетона.

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

As a result of the experimental study, there was estimated the variability of the form of complete diagrams $\sigma - \epsilon$ of concrete under uniaxial compression. It is shown that the coefficients of variation of concrete deformation characteristics are comparable with the coefficient of variation of strength within one concrete class in terms of compressive strength. It was found out that the effect of freezing and thawing cycles leads not only to a decrease in the compressive strength of concrete, but also to a decrease in the ultimate deformations and the initial modulus of elasticity. Thus, when using diagram methods for calculating reinforced concrete structures, it is necessary to take into account the influence of variability not only in the strength, but also in the deformation characteristics of concrete.

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

Введение

В действующих нормах по проектированию железобетонных конструкций рекомендуется «при расчетах прочности железобетонных конструкций по нормальным сечениям использовать нелинейную деформационную модель. При реализации этого метода используются рас-

четные диаграммы $\sigma - \epsilon$ материалов, сформированные на базе экспериментальных данных, что позволяет учесть влияние не только прочностных, но и деформационных характеристик материалов» [11] и повысить достоверность расчетов. Форма расчетных диаграмм $\sigma - \epsilon$ бетона определяется значениями максимальных напря-

жений (прочности), деформаций, соответствующих этим напряжениям, и начального модуля упругости. При этом 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 %. Для часто встречающихся расчетных сочетаний нагрузок, включающих кратковременные нагрузки, расчетные диаграммы определяются с помощью прочностных и деформационных характеристик бетона, соответствующих кратковременному нагружению. Учет при расчетах несиловых воздействий на бетон, приводящих к его деградации, например циклов замораживания и оттаивания (ЦЗО), осуществляют, используя понижающий коэффициент к значению расчетного сопротивления бетона. При этом значения деформационных характеристик бетона при действии кратковременных нагрузок не меняются. Таким образом, при расчетах железобетонных конструкций на прочность не полностью учитывается изменчивость формы диаграммы $\sigma - \epsilon$ бетона, а также влияние на форму этой диаграммы деградации бетона. Объяснить данный факт можно тем, что данные по изменчивости прочности бетона имеются в нормативной и научной литературе и на их основе определены расчетные значения прочности, а имеющихся экспериментальных данных по деформационным характеристикам бетона [1–8] пока недостаточно для понимания характера их статистического распределения. В работах [1, 9] обращается внимание на необходимость учета изменчивости деформационных характеристик бетона при расчете конструкций. В [9–11] показано, что значения деформационных характеристик материалов могут оказывать существенное влияние на результаты расчетов по прочности, в том числе на обеспеченность прочности изгибаемых (при больших процентах армирования) и внецентренно сжатых железобетонных элементов.

Соответственно, целью настоящей работы являлось получение полных диаграмм $\sigma - \epsilon$ бетона при одноосном сжатии для оценки изменчивости деформационных характеристик (предельных деформаций бетона ϵ_{b0} и модуля упругости E_b) в пределах одного класса бетона по прочно-

сти на сжатие, а также оценка воздействия циклов замораживания и оттаивания на вид этих диаграмм.

Материалы и методы

Для проведения экспериментальных исследований было изготовлено 36 бетонных образцов — призм размером 100×100×400 мм. Состав бетона проектировался для класса прочности на сжатие В30. Требуемая средняя прочность бетона определялась исходя из расчетного сопротивления бетона соответствующего класса по СП 63.13330.2018 и нормативного значения коэффициента вариации прочности бетона на сжатие, равного 13,5 %, по формуле

$$R_{cp} = R_b / (1 - 3v). \quad (1)$$

После изготовления образцы находились 28 суток в нормальных условиях, а затем хранились два месяца в закрытом помещении. Четырнадцать образцов перед испытаниями были подвергнуты ЦЗО, а оставшиеся двадцать два ЦЗО не подвергались. Все образцы были испытаны для получения диаграмм $\sigma - \epsilon$ бетона при одноосном сжатии.

Испытания проводились на испытательной машине «ИП-1000-М-авто», оборудованной системой управления/измерения ASTM-Digital «Профессиональная». Данное оборудование позволяет устанавливать произвольные режимы нагружения с обратной связью, как по усилию, так и по перемещению плиты пресса. Способ нагружения принят исходя из методики, описанной в [2]. Образцы нагружались при постоянной скорости перемещения плиты пресса, равной 0,005 мм/с, что позволило получить полные диаграммы $\sigma - \epsilon$ бетона при сжатии с ниспадающей ветвью. Деформации бетона определялись осевым экстензометром EPSILON 3542RA с базой 250 мм. Загружение каждого образца осуществлялось до появления видимых невооруженным взглядом трещин. За счет высокой жесткости испытательной машины и высокой точности поддержания скорости перемещения ее плиты удалось избежать взрывного характера разрушения, характерного для призм. Это позволило не снимать с образца экстензометр до полного окончания его испытания — появления видимых трещин. Значения напряжений вычислялись как частное от деления усилия, создаваемого прессом, на площадь сечения образца. Значения пре-

дельных относительных деформаций бетона ε_{b0} находились как деформации, соответствующие максимуму напряжений. Модуль упругости вычислялся на основании методики, приведенной в ГОСТ 24452–80, как частное от деления напряжений, составляющих 30 % от их максимального значения, на величину соответствующих относительных деформаций.

Методика замораживания и оттаивания образцов базировалась на ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». За основу был взят третий ускоренный метод. Образцы выдерживались в солевом растворе и после этого помещались в полиэтиленовые пакеты, которые предотвращали высыхание образцов в камере тепла-холода в процессе ЦЗО. Каждый цикл состоял из замораживания до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержки при этой температуре, поднятия температуры до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ с выдержкой при данной температуре, нагрева до $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и размораживания образцов. Все подвергаемые ЦЗО образцы прошли шесть циклов. Количество ЦЗО определялось исходя из прогнозируемого снижения средней прочности в пределах 10–20 %.

Результаты

В результате испытаний получены диаграммы, показанные на рис. 1 и 2. Значения максимальных напряжений, предельных деформаций

и модуля упругости для испытанных образцов приведены в табл. 1 и 2. Также в таблицах представлены средние значения вышеуказанных величин и их коэффициенты вариации. Для сравнения в табл. 1 показаны средние значения прочности, рассчитанные по (1), а также значения начального модуля упругости и предельных деформаций в соответствии с действующими нормами.

Все полученные диаграммы в целом схожи и включают в себя характерные участки преобладания упругих деформаций (примерно до $0,5\sigma_{\max}$), преобладания пластических деформаций ($0,5\sigma_{\max} - \sigma_{\max}$) и ниспадающую ветвь. Средние значения начального модуля упругости и предельных деформаций, полученные в эксперименте, несколько меньше значений, указанных в нормах. Заметно, что при близких значениях прочности образцов форма соответствующих диаграмм $\sigma - \varepsilon$ различается. В целом полученные результаты качественно совпадают с приведенными в [7].

Полученные в результате эксперимента диаграммы очень хорошо аппроксимируются аналитической зависимостью ЕКБ – ФИП¹ (формула Саржина), которая имеет вид

¹ Европейский комитет по бетону и железобетону (ЕКБ) — Международная федерация по преднапряженному железобетону (ФИП — фр. Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP)).

Рис. 1. Диаграммы $\sigma - \varepsilon$ при осевом сжатии образцов, не подвергавшихся ЦЗО

Рис. 2. Диаграммы $\sigma - \epsilon$ при осевом сжатии образцов после ЦЗО

Таблица 1

Значения прочностных и деформационных характеристик испытанных образцов, не подвергавшихся ЦЗО

№ п/п	Максимальные напряжения $\sigma_{\max}$, МПа	Пределные деформации ϵ_{b0} , ‰	Начальный модуль упругости E_b , ГПа
1	27,5	1,766	29,72
2	32,8	2,210	28,16
3	29,9	1,677	29,16
4	30,2	1,877	27,35
5	38,3	2,014	32,58
6	29,8	1,860	30,97
7	29,2	1,948	29,71
8	30,4	2,070	27,39
9	29,2	1,844	28,16
10	27,0	2,000	27,11
11	29,7	1,854	29,92
12	26,2	1,646	27,89
13	25,4	1,844	25,32
14	28,2	1,748	27,44
15	25,9	1,921	25,02
16	26,9	2,026	26,44
17	29,5	1,922	28,04
18	25,3	1,601	28,60
19	25,9	1,685	27,76
20	24,6	1,660	25,73
21	27,7	1,773	28,45
22	25,5	1,763	26,28
Среднее значение	28,4	1,850	28,05
Среднее значение по СП	28,6	2,000	32,50
Коэффициент вариации	10,8 %	6,6 %	4,8 %

Таблица 2

**Значения прочностных и деформационных характеристик образцов,
испытанных после ЦЗО**

№ п/п	Максимальные напряжения $\sigma_{\max}$, МПа	Пределные деформации ε_{b0} , ‰	Начальный модуль упругости E_b , ГПа
1	22,3	1,516	26,31
2	19,8	1,538	24,33
3	25,5	1,770	23,26
4	23,8	1,976	16,86
5	28,5	1,639	27,37
6	25,2	1,743	24,40
7	25,7	1,721	23,48
8	30,4	1,885	25,56
9	24,3	1,843	20,09
10	22,6	1,513	25,26
11	26,5	1,465	33,12
12	24,7	1,842	21,70
13	23,2	1,834	18,54
14	22,7	1,800	19,43
Среднее значение	24,7	1,720	23,55
Коэффициент вариации	10,9 %	7,7 %	13,0 %

$$\sigma_b = R_b \left(k\eta - \eta^2 / 1 + (k-2)\eta \right),$$

$$\eta = \varepsilon_b / \varepsilon_{b0}, \quad k = E_b \varepsilon_{b0} / R_b. \quad (2)$$

В качестве примера на рис. 3 приведены две экспериментальные диаграммы по одной для каждой серии образцов (до и после ЦЗО) и построенные по характерным точкам этих диа-

грамм кривые, вычисленные по выражению (2). Восходящая ветвь экспериментальных диаграмм практически совпадает с аналитической кривой. Нисходящая ветвь имеет несколько большее отличие. Однако в целом аналитическая зависимость ЕКБ – ФИП с достаточной точностью соответствует экспериментальным данным и мо-

Рис. 3. Экспериментальные диаграммы $\sigma - \varepsilon$ бетона при одноосном сжатии (сплошная линия) и аппроксимирующие их кривые по формуле (2) (пунктир)

жет использоваться для расчета несущей способности железобетонных конструкций из бетонов средней прочности (В15–В60), что совпадает с выводами других исследователей [12].

Для всех серий образцов имеет место изменчивость формы диаграмм $\sigma - \epsilon$, которая характеризуется коэффициентами вариаций предельных деформаций и начального модуля упругости. Малый объем проведенного эксперимента не позволяет с достаточной точностью определить возможные диапазоны изменчивости деформационных характеристик бетона, однако можно утверждать, что значения коэффициентов вариации предельных деформаций и начального модуля упругости сравнимы со значениями коэффициента вариации прочности. При близких значениях прочности значения деформаций и модуля упругости для разных образцов существенно отличаются. Например, образцы до ЦЗО № 3 и № 8 при схожей прочности существенно отличаются по предельным деформациям (1,667 и 2,070 ‰ соответственно).

Влияние ЦЗО на форму диаграммы $\sigma - \epsilon$ бетона при одноосном сжатии выражается в снижении максимальных напряжений (среднее значение максимальных напряжений снизилось на 13,2 %), уменьшении начального модуля упругости (среднее значение снизилось на 16 %) и снижении предельных деформаций (среднее значение снизилось на 7 %). ЦЗО разрушают внутреннюю структуру бетона, что приводит к снижению энергии разрушения, которая характеризуется площадью, ограниченной диаграммой $\sigma - \epsilon$ и горизонтальной осью координат. Данную площадь можно определить по формуле

$$A = \int_0^{\epsilon_{b2}} \sigma(\epsilon) d\epsilon, \quad (3)$$

где $\sigma(\epsilon)$ — функция, аппроксимирующая диаграмму $\sigma - \epsilon$, в качестве которой используется

выражение (2). Значение ϵ_{b2} определяется исходя из условия снижения напряжений на нисходящей ветви диаграммы на 15 % по сравнению с максимальным значением в вершине диаграммы.

Размерностью данной величины будет $\text{МПа} \frac{\text{м}}{\text{м}} = \frac{\text{МН} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{м}} = \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$. Таким образом, физический смысл площади, заключенной под диаграммой $\sigma - \epsilon$ — это энергия, необходимая для разрушения единицы объема бетона. Энергия разрушения характеризует способность материала сопротивляться силовым и несиловым воздействиям, в том числе ЦЗО.

Энергия разрушения является комплексной характеристикой и зависит не только от прочности материала, но и от его деформационных свойств. В большей степени на нее влияют предельные деформации, в меньшей — модуль упругости. Исходя из гипотезы инвариантности величины удельной энергии бетона при его разрушении [13–15], энергия разрушения не зависит от скорости нагружения и может быть базовой характеристикой при определении расчетных параметров (прочности, деформаций, начального модуля упругости) бетона при различной длительности нагружения. Средние значения энергии разрушения для серий испытанных образцов, определенные по выражению (3), и соответствующие им средние значения прочностных и деформационных характеристик показаны в табл. 3.

Анализируя данные табл. 3, можно отметить, что величина энергии разрушения более полно, чем прочность, характеризует возможности работы материала в конструкции. В результате воздействия ЦЗО средняя прочность бетонных образцов класса по прочности на сжатие В30 снизилась на 13,2 %, а энергия разрушения образцов после ЦЗО (42 809 МДж/м³)

Таблица 3

Средние значения энергии разрушения в сериях образцов и соответствующие им средние значения прочностных и деформационных характеристик бетона

Серия	Энергия разрушения, МДж/м³	Максимальные напряжения σ_{max} , МПа	Предельные деформации ϵ_{b0} , ‰	Начальный модуль упругости E_b , ГПа
До ЦЗО	58 039	28,4	1,850	28,05
ЦЗО	42 809	24,7	1,720	23,55

оказалась меньше, чем соответствующая характеристика образцов до ЦЗО на 26,2 %. Причиной этому оказалось снижение значения предельных деформаций бетона в процессе ЦЗО. Таким образом, учет действия ЦЗО при расчетах конструкций только путем использования понижающего коэффициента к расчетному сопротивлению бетона не полностью отражает снижение энергетического потенциала материала. Особенно это актуально для диаграммных методов расчета железобетонных конструкций.

Выводы

1. В результате экспериментальных исследований получены данные об изменчивости формы диаграммы $\sigma - \epsilon$ бетона при осевом сжатии.

2. Определенные по результатам эксперимента коэффициенты вариации предельных деформаций бетона при сжатии и начального модуля упругости бетона сопоставимы с коэффициентом вариации прочности бетона при сжатии. Соответственно, изменчивость деформационных характеристик бетона должна учитываться при расчетах железобетонных конструкций на прочность.

3. Полученные в результате эксперимента диаграммы очень хорошо аппроксимируются аналитической зависимостью ЕКБ – ФИП (формула Саржина).

4. Комплексной характеристикой способности бетона сопротивляться силовым и несиловым воздействиям может служить энергия разрушения, которая численно равна площади, ограниченной диаграммой $\sigma - \epsilon$ бетона при одноосном сжатии.

5. При расчете прочности железобетонных конструкций, подвергающихся циклам замораживания-оттаивания, при кратковременных воздействиях нагрузки диаграммными методами недостаточно применения понижающего коэффициента к расчетному сопротивлению бетона. В этом случае необходимо также учитывать снижение предельных деформаций и начального модуля упругости бетона.

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. 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. Мкртчян А. М., Аксенов В. Н. Аналитическое описание диаграммы деформирования высокопрочных бетонов // *Инженерный вестник Дона*.

2013. № 3. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1818>.

13. Леонович С. Н., Литвиновский Д. А., Чернякевич О. Ю., Степанова А. В. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях: в 2 ч. / под ред. С. Н. Леоновича. Минск: БНТУ, 2016. Ч. 1. 393 с.

14. Никулин А. И. Энергетический подход к определению динамической прочности бетона при неоднородном импульсном растяжении // Наука и инновации в строительстве: сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2017. С. 76–81.

15. Никулин А. И. О динамической прочности бетона при неоднородном импульсном сжатии // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2017. № 1. С. 77–81.

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 gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of 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 recycled aggregate concrete under uniaxial compression loading *Journal of Cleaner Production*, 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*, 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 Vserossiyskoy (II Mezhdunarodnoy) konferentsii po betonu i zhelezobetonu v 7 tomakh. 2014 «Beton i zhelezobeton - vzglyad v budushchee»* [Proceedings of the III All-Russian (II International) conference on concrete and reinforced concrete “Concrete and reinforced concrete-a look into the future” in 7 vols.]. Vol. 1. Moscow, Natsional'niy issledovatel'skiy Moskovskiy gosudarstvenniy stroitel'niy universitet Publ., 2014, 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 Vserossiyskoy (II Mezhdunarodnoy) konferentsii po betonu i zhelezobetonu v 7 tomakh. 2014 «Beton i zhelezobeton - vzglyad v budushchee»* [Proceedings of the III All-Russian (II International) conference on concrete and reinforced concrete “Concrete and reinforced concrete-a look into the future” in 7 vols.]. Vol. 3. Moscow, Natsional'niy issledovatel'skiy Moskovskiy gosudarstvenniy stroitel'niy universitet Publ., 2014, pp. 356–366.
10. Popov V. M., Plyusnin M. G. *Vliyanie deformatsionnykh kharakteristik betona na nesushchuyu sposobnost' vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov* [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* [Estimation of the influence of the longitudinal force eccentricity on the load-bearing capacity of compressed reinforced concrete elements]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil construction*, 2019, no. 6, pp. 29–34.
12. Mkrtchyan A. M., Aksenov V. N. *Analiticheskoe opisanie diagrammy deformirovaniya vysokoprochnykh betonov* [Analytical description of the deformation curve of high-strength concrete]. *Setevoy nauchniy zhurnal «Inzhenerniy vestnik Dona» – Network scientific journal “Engineering Bulletin of the Don”*, 2013, no. 3. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1818>
13. Leonovich S. N., Litvinovskiy D. A., Chernyakevich O. Yu., Stepanova A. V. *Prochnost', treshchinostoykost' i dolgovechnost' konstruktivnogo betona pri temperaturnykh i korroziyonnykh vozdeystviyakh* [Strength, crack resistance and durability of structural

concrete under temperature and corrosion effects]. In 2 Pts. Ed. by Leonovich S. N. Minsk, BNTU Publ., 2016, Pt. 1, 393 p.

14. Nikulin A. I. *Energeticheskiy podkhod k opredeleniyu dinamicheskoy prochnosti betona pri neodnorodnom impulsnom rastyazhenii* [Energy approach to determining the dynamic strength of concrete under inhomogeneous pulsed tension]. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: BGTU im. V. G. Shukhova*

«*Nauka i innovatsii v stroitel'stve*» [Proc. of the international scientific and practical conference at BSTU named after V. G. Shukhov "Science and innovation in construction"]. Belgorod, 2017, pp. 76–81.

15. Nikulin A. I. *O dinamicheskoy prochnosti betona pri neodnorodnom impulsnom szhatii* [On the dynamic strength of concrete under inhomogeneous impulse compression]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova – Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2017, no. 1, pp. 77–81.