

Совершенствование технологии изготовления центрифугированных изделий за счет отдельного введения минеральных компонентов бетонной смеси

*Г.В. Несветаев, М.П. Нажуев, А.К. Халюшев,
А.А. Чернильник, Д.Ю. Кучеренко, А.А. Ганина
Донской государственный технический университет*

Аннотация: Представлены и теоретически обоснованы пути совершенствования технологии центрифугирования, направленные на повышение однородности структуры бетона по сечению, например, посредством способа отдельного введения компонентов бетонной смеси, сущность которого при производстве центрифугированных изделий состоит во введении внутрь формируемого изделия перед стадией уплотнения крупного заполнителя. Получены результаты физико-механических испытаний центрифугированных бетонов, показывающие, что послойное введение компонентов бетонной смеси по первому способу приводит к увеличению предела прочности при сжатии во всех слоях центрифугированного бетона.

Статья опубликована в рамках реализации программы Международного Форума «Победный май 1945 года».

Ключевые слова: бетон, центрифугирование, однородность структуры, послойное введение компонентов, уплотнение, водопоглощение при капиллярном подсосе, прочность.

Как известно, центрифугирование бетона основано на способности бетонной смеси внутри вращающейся формы уплотняться под действием центробежных сил, пропорциональных массе частиц, квадрату угловой скорости и расстоянию от оси вращения [1-4]:

$$F_{цс} = \frac{4}{3 \times g} \pi \cdot r_{кз}^3 \times \rho_{кз} \cdot l \cdot \omega^2 \quad (1)$$

где l – расстояние от центра вращения до центра зерна, м.

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (2)$$

где ω – угловая скорость вращения при $n_{упл} = 1500$ об/мин для \varnothing образца 205 мм, рад/с.

Действие центробежной силы на зерно крупного заполнителя (рис. 1) тем значительнее, чем больше радиус и масса частицы. В связи с этим зерна

более крупных размеров становятся прижатыми к внешней поверхности изделия, а более мелкие концентрируются у внутренней поверхности изделия. В связи с этим центрифугированный бетон отличается от вибрированного неоднородностью распределения зерен крупного заполнителя по сечению изделия, что может снижать прочностные свойства центрифугированных бетонов. Помимо тщательного подбора состава центрифугированного бетона максимальная плотность и однородность структуры может быть обеспечена правильным способом и режимом формования [5-8]. В связи с этим представляет научный интерес совершенствование технологии центрифугирования, направленное на повышение однородности структуры бетона по сечению, например, посредством способа раздельного введения компонентов бетонной смеси [9, 10], сущность которого при производстве центрифугированных изделий состоит во введении внутрь формируемого изделия перед стадией уплотнения крупного заполнителя.

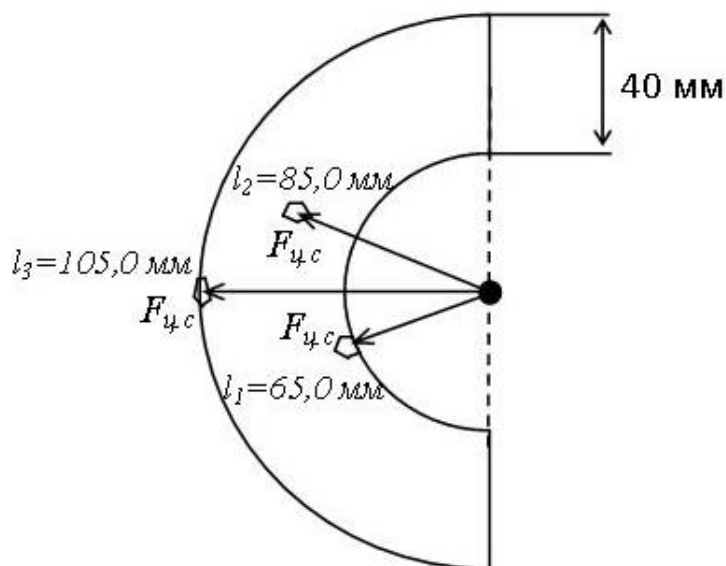


Рис. 1 – Схема действия центробежной силы на зерно крупного заполнителя по толщине стенки центрифугированного изделия.

Выполним расчет по оценке центробежной силы на зерно плотного крупного заполнителя по ф.(1) в зависимости от его положения по толщине стенки центрифугированного изделия [11-14]. В качестве исходных данных примем $r_{к.з.}$ – радиус зерна крупного заполнителя (2,5; 5 мм), м, а $\rho_з$ – средняя плотность зерна заполнителя (например, гранит – 2690), кг/м³ (рис. 2).

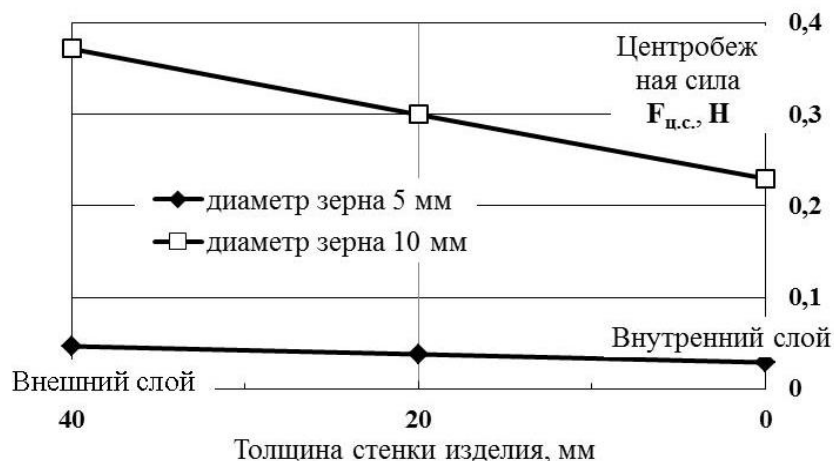


Рис. 2 – Изменение действия центробежной силы на зерно крупного заполнителя по толщине стенки центрифугированного изделия на стадии уплотнения

При раздельном введении крупного заполнителя осуществляется послойное формование при центрифугировании изделия, при этом сначала вводится часть растворной составляющей и формируется сечение, а затем вводится крупный заполнитель фракции 5-10 мм с последующим уплотнением. Возможно чередование несколько слоев. Классический способ заключается в одностадийном формировании сечения из обычной бетонной смеси. В таблице №1 представлен состав бетонной смеси для центрифугированных изделий [15-18].

Таблица №1

Составы бетонной смеси для центрифугированных изделий

№	Фракция крупного	Расход материалов на 1 м ³	Осадка	Фактическая
---	------------------	---------------------------------------	--------	-------------

Соста ва	заполнителя, мм	Щебень	Песок	Цемент	Вода	конуса, см	средняя плотность бетонной смеси, кг/м ³
1	5,0-10,0	1274	658	398	217	3,5	2375

В процессе формования регулирование скорости вращения формы позволяет изменять величину прессующего давления (таблица №2).

Таблица №2

Основные параметры формования при центрифугировании

Основные стадии формования при центрифугировании	Скорость вращения формы об/мин	Давление на бетонную смесь, p кгс/см ²	Угловая скорость вращения, рад/с	Диаметр трубы, см
загрузки	100-190	0,044	11-20,0	20,5
распределения	159-250	0,076	17-26	
уплотнения	1500	2,75	157	

Предел прочности и другие свойства центрифугированного бетона определяли на сегментах, полученных распиливанием изделия с наружным диаметром 205 мм и толщиной стенки 40 мм (рис. 3, 4).



Рис. 3 – Сегментные части центрифугированного изделия

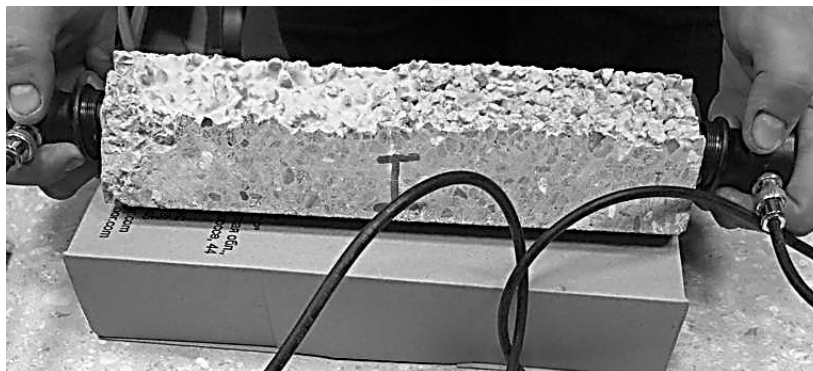


Рис. 4 – Прозвучивание образцов центрифугированного изделия.

Результаты испытаний представлены в таблице №3.

Таблица №3

Скорость ультразвука в образцах, м/с

Способ	Поверхностное прозвучивание		Сквозное прозвучивание	b/a
	Внешний слой	Внутренний слой		
1	4200 (<i>a</i>)	3661,4 (<i>b</i>)	3763	$b/a = 0,872$
2	3827,8 (<i>a</i>)	3479 (<i>b</i>)	3455	$b/a = 0,903$

Плотность центрифугированных изделий определяли по ГОСТ 12730.3-78 бетоны. Метод определения водопоглощения. Методы определения плотности. Методы определения плотности. Результаты представлены в таблице №4.

Таблица №4

Свойства бетонов

Бетон	Объем образца V_0 , см^3	Масса сухого образца m , г	Масса водонасыщенного образца m_1 , г	Средняя плотность, ρ $\text{кг}/\text{м}^3$	Водопоглощение, %
1-I (способ)	484,15	1097,05	1142,85	2262	4,36
1-II (способ)	511,95	1095,10	1160,30	2139	5,95

Водопоглощение при капиллярном подсосе определяли по ГОСТ 31356-2007. Одни образцы помещали торцевой гранью в ванну (рис. 5), а другие устанавливали в продольном направлении по толщине стенки центрифугированного изделия одного из восьми сегментов на сетчатую подставку. Ванну заполняют водой температурой $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ так, чтобы торец и продольный слой толщины стенки были погружен в воду на 5-10 мм. Уровень воды в ванне должен поддерживаться постоянным в течение всего времени испытания. Результаты представлены в таблице №5.

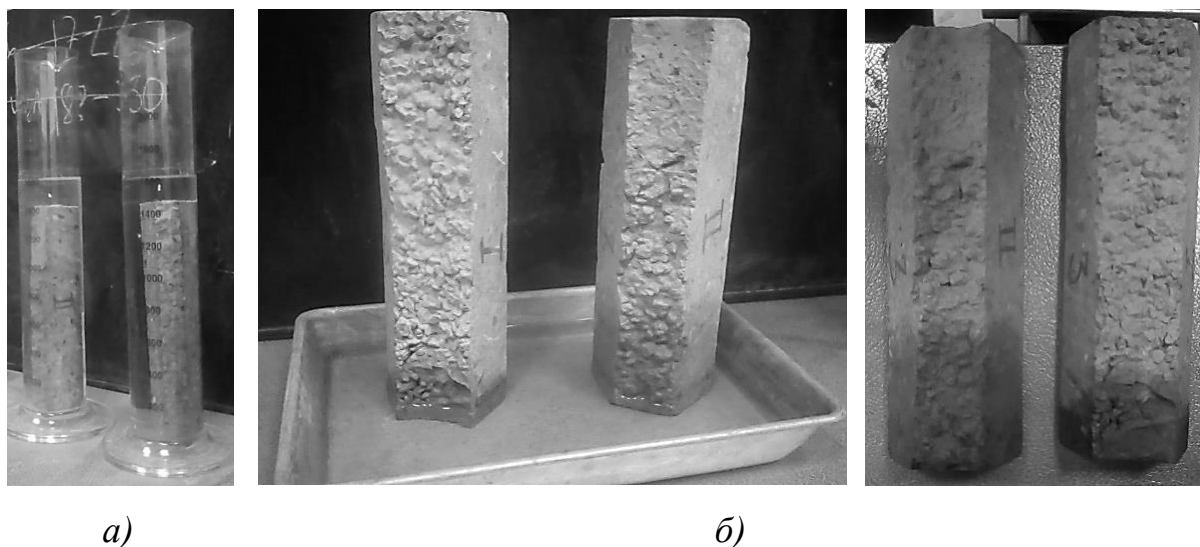


Рис. 5 – Испытания образцов центрифугированного изделия на структурно-физические свойства: *а)* определение средней плотности; *б)* водопоглощение при капиллярном подсосе.

Водопоглощение при капиллярном подсосе, $W_{\text{кп}}$ $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}^{0,5})$, определяют по формуле:

$$W_{\text{кп}} = k_w \frac{m_2 - m_1}{S}, \quad (3)$$

где m_1 – масса сухого образца, кг; m_2 – масса образца после насыщения водой, кг; S – площадь увлажняемой грани образца, м²; k_w – коэффициент, учитывающий время насыщения образца и равный $\frac{1}{\sqrt{24}}$, ч^{-0,5} = 4,89.

Таблица №5

Водопоглощение при капиллярном подсосе

№ Состав	Расположение образца	Масса образцов в сухом состоянии m_1 , кг	Масса образца после насыщения водой m_2 , кг	Площадь, S , м ²	Водопоглощение при капиллярном подсосе $W_{\text{кп}}$, кг/(м ² ·ч ^{0,5})
1-I (способ)	в торцевом направлении	2,194	2,217	0,0036	6,39
	в продольном	2,194	2,280	0,01375	6,25
1-II (способ)	в торцевом направлении	2,290	2,320	0,00416	7,21
	в продольном	2,290	2,370	0,01251	6,39

По скорости распространения ультразвука в бетоне исследуемой конструкции, динамический модуль упругости бетона (E_d) можно вычислить по формуле [18-20]:

$$E_d = c \cdot \rho \cdot v^2 \quad (4)$$

где v – скорость распространения колебаний, км/с; ρ – плотность бетона, кг/м³; $c = 0,745$.

Динамический модуль упругости бетона (E_d) связан со статическими характеристиками модуля упругости (E_0) следующей эмпирической формулой [19, 20]:

$$E_0 = 0,831 \cdot E_d \quad (5)$$

Начальный модуль упругости E_0 , ГПа, связан с пределом призмной прочности на сжатие R_{pr} , МПа, зависимостью [19, 20]:

$$E = \frac{0,05 \cdot R_{pr} + 57}{\left(1 + \frac{29}{9,8 + R_{pr}}\right)} \quad (6)$$

откуда

$$0,05 \cdot R_{pr}^2 + 57,19 \cdot R_{pr} = 30 \cdot E_0 + 216,6 \quad (7)$$

В таблице №6 представлены расчетные значения R_{pr} , полученные из ф.(6) с учетом ф.(4,5) и таблицы №3.

Таблица №6

Механические свойства образцов центрифугированного изделия

Наименование показателя	Механические свойства образцов центрифугированного изделия					
	1-I (способ)			1-II (способ)		
	Внешний слой	Внутренний слой	Сквозное прозвучивание	Внешний слой	Внутренний слой	Сквозное прозвучивание
Динамический модуль упругости E_d , ГПа	29,73	22,59	23,86	25,32	20,91	20,62
Начальный модуль упругости E , ГПа	24,7	18,77	19,83	21,04	17,38	17,14
Прочность бетона $R = R_{pr}/0,8$, Мпа/%	<u>22,3</u> 138,5 ¹	<u>12,5</u> 113,6 ²	<u>14,4</u> 135,8 ³	<u>16,1</u> 100 ¹	<u>11,0</u> 100 ²	<u>10,6</u> 100 ³

Полученные результаты физико-механических испытаний центрифугированных бетонов показывают, что послойное введение компонентов бетонной смеси по первому способу приводит к увеличению предела прочности при сжатии во внешнем слое и в среднем по сечению более 35 % в сравнении со вторым способом. Повышение прочности внутреннего слоя порядка 13 %. Таким образом, существенным недостатком является достаточно большое различие в физико-механических свойствах внешнего и внутреннего слоев. Вероятно, эту проблему следует решать посредством введения химических модификаторов.

Литература

1. Маилян Л.Р., Стельмах С.А., Холодняк М.Г., Щербань Е.М. Исследование различных типов центрифуг и режимов уплотнения бетонных смесей для изготовления образцов кольцевого сечения // Вестник СевКавГТИ. 2017. Вып. №3 (30). С. 134-137.
2. Маилян Л.Р., Стельмах С.А., Холодняк М.Г., Щербань Е.М. Выбор видов волокон для дисперсного армирования изделий из центрифугированного бетона // Наукоедение, 2017, № 4 URL: naukovedenie.ru/PDF/71TVN417.pdf.
3. Маилян Л.Р., Стельмах С.А., Холодняк М.Г., Щербань Е.М., Халюшев А.К. Влияние технологии производства на структурообразование и свойства бетона виброцентрифугированных колонн // Строительство и архитектура (2017). Том 5. Выпуск 4 (17). С. 224-228.
4. Холодняк М.Г., Стельмах С.А., Маилян Л.Р., Щербань Е.М., Нажуев М.П. Изучение характера механизма дрейфа компонентов бетонной смеси при производстве центрифугированных колонн вариатропной структуры на примере физической модели движения заполнителей // Строительство и архитектура (2017). Том 5. Выпуск 4 (17). С. 229-233.
5. Нажуев М.П., Яновская А.В., Холодняк М.Г., Халюшев А.К., Щербань Е.М., Стельмах С.А. Изучение опыта регулирования свойств строительных



изделий и конструкций путем направленного формирования их вариатропной структуры // Инженерный вестник Дона, 2017, № 3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4313.

6. Маилян Д.Р., Несветаев Г.В., Халезин С.В., Горцевской А.А. Деформационные свойства и параметрические точки бетонов каркасной структуры // Инженерный вестник Дона, 2018 №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4941.

7. Маилян Л.Р., Стельмах С.А., Холодняк М.Г., Щербань Е.М. Выбор состава центрифугированного бетона на тяжелых заполнителях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №10. С. 52-57.

8. Стельмах С.А., Щербань Е.М., Сердюков К.В., Пестриков М.М., Яновская А.В. Влияние некоторых характеристик применяемого крупного заполнителя на свойства тяжелого бетона, предназначенного для изготовления центрифугированных изделий и конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №10. С. 15-20.

9. Несветаев Г.В., Кардумян Г.С. Модуль упругости цементного камня с суперпластификаторами и минеральными модификаторами с учетом его собственных деформаций при твердении. Бетон и железобетон. 2013. №6. С. 10-13.

10. Холодняк М.Г., Стельмах С.А., Щербань Е.М., Третьяков Д.А., Дао В.Н., Заикин В.И. Предложения по расчетному определению прочностных характеристик вибрированных, центрифугированных и виброцентрифугированных бетонов // Вестник Евразийской науки, 2018, №6 URL: <https://esj.today/PDF/66SAVN618.pdf>.

11. Ахвердов И. Н. Железобетонные напорные центрифугированные трубы. М.: Стройиздат, 1967. 164 с.

12. Ахвердов И.Н. Вопросы теории центробежного формования и уплотнения бетонной смеси. – Республиканское научно – техническое совещание: Технология формования железобетонных изделий, 1979. С. 3-12.

13. Романенко Е.Ю. Высокопрочные бетоны с минеральными пористыми и волокнистыми добавками для изготовления длинномерных центрифугированных конструкций : дис.... канд. техн. наук: 05.23.05. Ростов-на-Дону, 1989. 179 с.

14. Дубинина В.Г. Разработка оптимальных параметров центрифугирования железобетонных безнапорных труб : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Нижний Тагил, 2002. 150 с.

15. Попов А.Н. Производство и применение железобетонных и бетонных труб для напорных и безнапорных трубопроводов. – М., 1975. С. 149.

16. Петров В.П. Технология и свойства центрифугированного бетона с комбинированным заполнителем для стоек опор контактной сети : дис.... канд. техн. наук: 05.23.05. Ростов-на-Дону, 1983. 175 с.

17. Раджан Сувал Свойства центрифугированного бетона и совершенствование проектирования центрифугированных железобетонных стоек опор ЛЭП : дис.... канд. техн. наук: 05.23.05. Ростов-на-Дону, 1997. 267 с.

18. Попов К.Н., Шмурнов И.К. Физико-механические испытания строительных материалов: Учеб. для техн. училищ. М.: Высш.школа, 1984. 208 с.

19. Pooya Alaei, Bing Li. High-strength concrete exterior beam-column joints with high-yield strength steel reinforcements // Engineering Structures. 2017. Vol. 145. pp. 305-321.

20. Mohamed K. Ismail, Assem A.A. Hassan. An experimental study on flexural behaviour of large-scale concrete beams incorporating crumb rubber and steel fibres. 2017. Vol. 145. pp. 97-108.

References

1. Mailyan L.R., Stel'makh S.A., Holodnyak M.G., Shcherban' E.M. Scientific bulletin SevKavGTI. 2017. №3 (30). pp. 134-137.
 2. Mailyan L.R., Stel'makh S.A., Holodnyak M.G., Shcherban' E.M. naukovedenie, Vol. 9, №4 (2017) URL: naukovedenie.ru/PDF/71TVN417.pdf.
 3. Mailyan L.R., Stel'makh S.A., Kholodnyak M.G., Shcherban' E.M., Khalyushev A.K. Construction and Architecture (2017) Vol. 5. Issue 4 (17). pp. 224-228.
 4. Kholodnyak M.G., Stel'makh S.A., Mailyan L.R., Shcherban' E.M., Nazhuev M.P. Construction and Architecture (2017) Vol. 5. Issue 4 (17). pp. 229-233.
 5. Nazhuev M.P., Yanovskaya A.V., Kholodnyak M.G., Khalyushev A.K., Shcherban' E.M., Stel'makh S.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, № 3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4313.
 6. Mailyan D.R., Nesvetaev G.V., Khalezin S.V., Gorzawski A.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, № 2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4941.
 7. Mailyan L.R., Stel'makh S.A., Holodnyak M.G., Shcherban' E.M. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. № 10. pp. 52-57.
 8. Stelmakh S.A., Scherban E.M., Serdyukov, K.V., Pestrikov, M.M., Yanovskaya, A.V. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. №10. pp. 15-20.
 9. Nesvetaev G.V., Kardumyan G.S. Concrete and reinforced concrete. 2013. №6. pp. 10-13.
 10. Kholodnyak M.G., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Tret'yakov D.A., Dao V.N., Zaikin V.I. The Eurasian Scientific Journal, 2018, №6 URL: esj.today/PDF/66SAVN618.pdf.
-

11. Akhverdov I.N. Zhelezobetonnye napornye tsentrifugirovannye trubyy [Reinforced concrete centrifuged tubes]. M.: Stroyizdat, 1967. 164 p.

12. Ahverdov I.N. Voprosy teorii centrobezhnogo formovaniya i uplotneniya betonnoy smesi [Questions of the theory of centrifugal molding and compacting of concrete mixes]. Respublikanskoe nauchno – tehicheskoe soveshanie: Tehnologiya formovaniya zhelezobetonnykh izdeliy, 1979. P. 3-12.

13. Romanenko E.Yu. Vysokoprochnye betony s mineral'nymi poristymi i voloknistymi dobavkami dlya izgotovleniya dlinnomernykh tsentrifugirovannykh konstruktsiy [High-strength concretes with mineral porous and fibrous additives for the manufacture of long-length centrifuged structures]: dis.... kand. tehn. nauk: 05.23.05. Rostov-on-Don, 1989. 179 p.

14. Dubinina V.G. Razrabotka optimal'nykh parametrov tsentrifugirovaniya zhelezobetonnykh beznapornykh trub [Development of optimal parameters for centrifugation of reinforced concrete non-pressure pipes]: dis.... kand. tehn. nauk: 05.23.05. Nizhniy Tagil, 2002. 150 p.

15. Popov A.N. Proizvodstvo i primeneniye zhelezobetonnykh i betonnykh trub dlya napornykh i beznapornykh truboprovodov [Manufacture and application of reinforced concrete and concrete pipes for pressure and non-pressure pipelines]. M., 1975. P. 149.

16. Petrov V.P. Tehnologiya i svoystva tsentrifugirovannogo betona s kombinirovannym zapolnitelem dlya stoek opor kontaktnoy seti [Technology and properties of centrifuged concrete with a combined aggregate for supports of the contact network]: dis.... kand. tehn. nauk: 05.23.05. Rostov-on-Don, 1983. 175 p.

17. Radzhan Suval Svoystva tsentrifugirovannogo betona i sovershenstvovanie proektirovaniya tsentrifugirovannykh zhelezobetonnykh stoek opor LEP [Properties of centrifuged concrete and perfection of design of centrifuged reinforced concrete pillars of power transmission lines]: dis.... kand. tekhn. nauk: 05.23.05. Rostov-on-Don, 1997. 267 p.



18. Попов К.Н., Shmurnov I.K. Fiziko-mekhanicheskie ispytaniya stroitel'nykh materialov [Physical and mechanical testing of building materials]: Ucheb. dlya tekhn. uchilishch. M.: Vyssh.shkola, 1984. 208 p.

19. Pooya Alae, Bing Li. High-strength concrete exterior beam-column joints with high-yield strength steel reinforcements. Engineering Structures. 2017. Vol. 145. pp. 305-321.

20. Mohamed K. Ismail, Assem A.A. Hassan. An experimental study on flexural behaviour of large-scale concrete beams incorporating crumb rubber and steel fibres. 2017. Vol. 145. pp. 97-108.