

Раздельное бетонирование при изготовлении центрифугированных железобетонных изделий

*Г.В. Несветаев¹, Г.Н. Хаджишалапов², М.П. Нажуев²,
Е. Ю. Евлахова¹, Д. А. Павлов¹, П. Б. Костюков¹*

¹Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

²Дагестанский государственный технический университет, Махачкала

Аннотация: При формировании в процессе центрифугирования кольцевого сечения по методу «раздельного» бетонирования с формированием сечения изделия на первой стадии из исходной, в т.ч. мелкозернистой бетонной смеси, и с введением на второй стадии внутрь сформированного кольцевого сечения крупного заполнителя с последующим окончательным формированием сечения и уплотнением бетонной смеси посредством центрифугирования при расчетных для стадии уплотнения оборотах обеспечивается повышение, в зависимости от зоны сечения, предела прочности бетона на сжатие от 20% до 47%, начального модуля упругости от 6 до 19% относительно одностадийного центрифугирования. Соотношение v_{int}/v_{ext} скоростей ультразвукового импульса при поверхностном прозвучивании по внутренней (v_{int}) и внешней (v_{ext}) грани центрифугированного кольцевого сечения может рассматриваться как условный показатель однородности структуры бетона по сечению центрифугированного изделия.

Ключевые слова: центрифугирование, раздельное бетонирование, однородность структуры, прочностные и деформационные свойства, пористость.

При изготовлении железобетонных изделий кольцевого сечения (трубы, колонны, опоры ЛЭП и т.п.) используется метод центрифугирования [1], позволяющий получать относительно тонкостенные изделия в сочетании с высокой прочностью и плотностью бетона. Поскольку центрифугирование сопровождается сегрегацией бетонной смеси, в т.ч. водоотделением, этот достаточно эффективный метод формования изделий обладает рядом недостатков, в частности, формирование неоднородной структуры и, естественно, прочностных и деформационных свойств бетона по толщине стенки изделия вследствие концентрации крупного заполнителя у наружной грани и растворной составляющей у внутренней, а также наличием фильтрационных каналов вследствие массопереноса. Указанные недостатки в большей степени присущи технологии однослойного центрифугирования, когда формирование сечения осуществляется сразу на всю толщину стенки.

Однородность бетона по сечению стенки изделия несколько повышается при реализации технологии двух и более стадийного центрифугирования, при реализации которой осуществляется послойное формирование и уплотнение изделия [2-5]. К недостаткам метода можно отнести значительное увеличение продолжительности технологического цикла [5-7]. Существенное повышение однородности структуры и свойств бетона по сечению стенки изделия при незначительном увеличении продолжительности технологического цикла может быть обеспечено при реализации технологии двухстадийного «раздельного» бетонирования, включающего следующие технологические операции: загрузка и распределение исходной бетонной смеси, возможно, мелкозернистой, формирование кольцевого сечения, введение внутрь формируемого сечения и распределение дополнительного объема крупного заполнителя, уплотнение бетонной смеси центрифугированием. При уплотнении изделия из исходной бетонной смеси, содержащей крупный заполнитель, под действием центробежных сил будет происходить перемещение крупного заполнителя к внешней грани, а растворной составляющей к внутренней, при этом дополнительно введенный крупный заполнитель под действием центробежных сил будет погружаться в эту растворную составляющую, что обеспечит более высокую концентрацию крупного заполнителя вблизи внутренней грани сечения. При уплотнении изделия из исходной мелкозернистой бетонной смеси под действием центробежных сил будет происходить перемещение дополнительно введенного крупного заполнителя в растворную составляющую. Важным условием формирования «однородного» сечения из исходной бетонной смеси с крупным заполнителем является выбор правильного соотношения объемов исходной бетонной смеси и дополнительного объема крупного заполнителя. В случае применения исходной мелкозернистой бетонной смеси важно

подобрать ее консистенцию, обеспечивающую возможность проникновения дополнительно введенного крупного заполнителя до внешней грани [7].

Экспериментальные исследования реализованы с применением материалов, представленных в табл. 1-3.

Таблица 1 – Основные характеристики щебня

Наименование материала	Фракция	Удельная поверхность, см ² /г	Насыпная плотность, кг/м ³	Истинная (средняя) плотность, кг/м ³	Пустотность, %	Общее водопоглощение
Щебень гранитный	5-20	4,2	1460	2700 (2690)	0,457	0,41
	10-20	2,7	1430		0,468	0,40
	5-10	5,4	1510		0,438	0,42

Таблица 2 – Основные характеристики песка

Сито, мм	Частный остаток, %	Удельная поверхность, см ² /г	Насыпная плотность, кг/м ³	Истинная плотность, кг/м ³	Пустотность, %	Общее водопоглощение
2,5	2,41	88,9	1259,4	2600	0,515	1,914
1,25	2,95					2,07
0,63	7,3					2,3
0,315	50,4					3,46
0,14	30,19					6,0
0,14<	4,24					12,0

Таблица 3 – Основные характеристики портландцемента

Наименование	Удельная поверхность, м ² /кг	Нормальная густота, %	Сроки схватывания, час. мин.		Активность, МПа	
			начало	конец	R _{из}	R _{сж}
Портландцемент	365	25,5	1-05	3-15	5,9	51,5

Физико-механические и конструктивные характеристики бетона определялись по результатам испытания центрифугированных образцов с наружным диаметром 205 мм и толщиной стенки 40 мм. Для определения

строительно-технических свойств бетона кольцевой образец распиливали на призмы. Определяли:

- среднюю плотность бетона – по ГОСТ 12730.3-78 Бетоны. Методы определения плотности;
- водопоглощение – по ГОСТ 12730.3-78 Бетоны. Метод определения водопоглощения;
- полную пористость – по ГОСТ 31356-2007 при значении истинной плотности $2,66 \text{ г/см}^3$;
- скорость прохождения ультразвука при сквозном (на базе 205 мм) и поверхностном (на базе 120 мм) прозвучивании – по ГОСТ 7624-2012 Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности, прибором «Пульсар-2.2»;
- капиллярный подсос – по ГОСТ 31356-2007;
- динамический модуль упругости E_d – по скорости ультразвука и средней плотности бетона по формуле [8-10]:

$$E_d = 0,745 \cdot \rho \cdot v^2, \quad (1)$$

- начальный (статический при уровне нагружения $\sigma/R = 0,3$) модуль упругости E_0 – по формуле:

$$E_0 = 0,823 \cdot E_d, \quad (2)$$

- предел призмочной прочности R_{pr} на сжатие – по величине статического модуля упругости бетона из формулы [11-14]:

$$E_0 = \frac{0,05 \cdot R_{pr} + 57}{1 + \frac{29}{3,8 + R_{pr}}}, \quad (3)$$

- предел кубиковой прочности на сжатие R – по формуле:

$$R = 0,787 \cdot R_0, \quad (4)$$

В табл. 4 и на рис.1 представлены результаты определения некоторых свойств бетона.

Таблица 4 – Свойства образцов центрифугированного бетона

№ состава	Способ формирования	Средняя плотность, ρ кг/м ³	Полная пористость, %	Водопоглощение по массе, %	Открытая пористость, %	Условно-закрытая пористость, %
1 (40/60)	двухстадийное	2262	14,81	4,17	9,46	5,35
2 (50/50)		2210	16,92	4,51	9,98	6,94
3 (60/40)		2160	18,8	4,82	10,41	8,39
4 (40/60)	одностадийное	2158	18,85	5,69	12,29	6,56
5 (50/50)		2139	19,58	5,95	12,74	6,85
6 (60/40)		2152	19,1	5,97	12,86	6,24

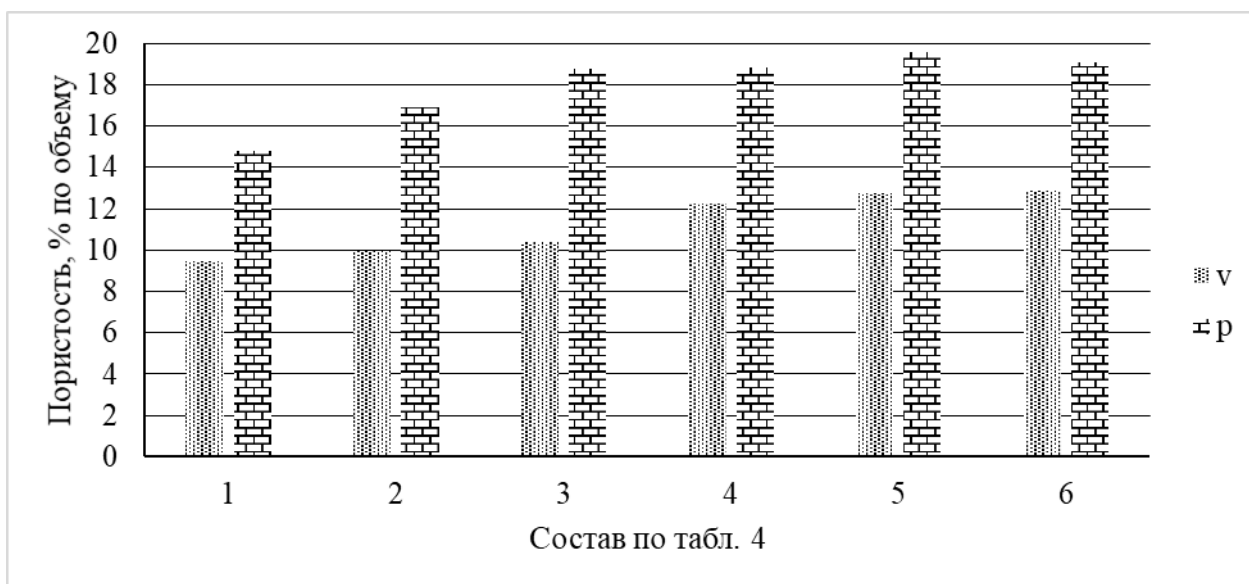


Рис. 1. Полная (p) и открытая (v) пористость бетонов

Из представленных на рис. 1 данных очевидно, что лучшие показатели пористости присущи составу №1 в табл. 4. Целесообразно исследовать эффективность применения крупного заполнителя с уменьшенным содержанием фракции 5-10.

На рис. 2 представлена зависимость предела расчетной кубиковой прочности на сжатие от полной пористости бетона [14-15].



Рис. 2. Зависимость предела прочности на сжатие от полной пористости бетона 2,1 – соответственно по двух (раздельное бетонирование) и одностадийной (эталонной) технологии центрифугирования.

T – по формуле $R = 95 \cdot \exp\left(-\frac{4.84P}{100}\right)$ [16], где P – полная пористость бетона

Очевидно, что зависимость «пористость-прочность» для составов бетона № 1 и № 4 в табл. 4 достаточно хорошо коррелирует с данными [16-17,7]. Для других составов значение прочности ниже.

На рис. 3 представлены результаты измерения величины капиллярного подсоса представленных в табл. 4 бетонов. Водопоглощение при капиллярном подсосе определяли по ГОСТ 31356-2007 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Методы испытаний».

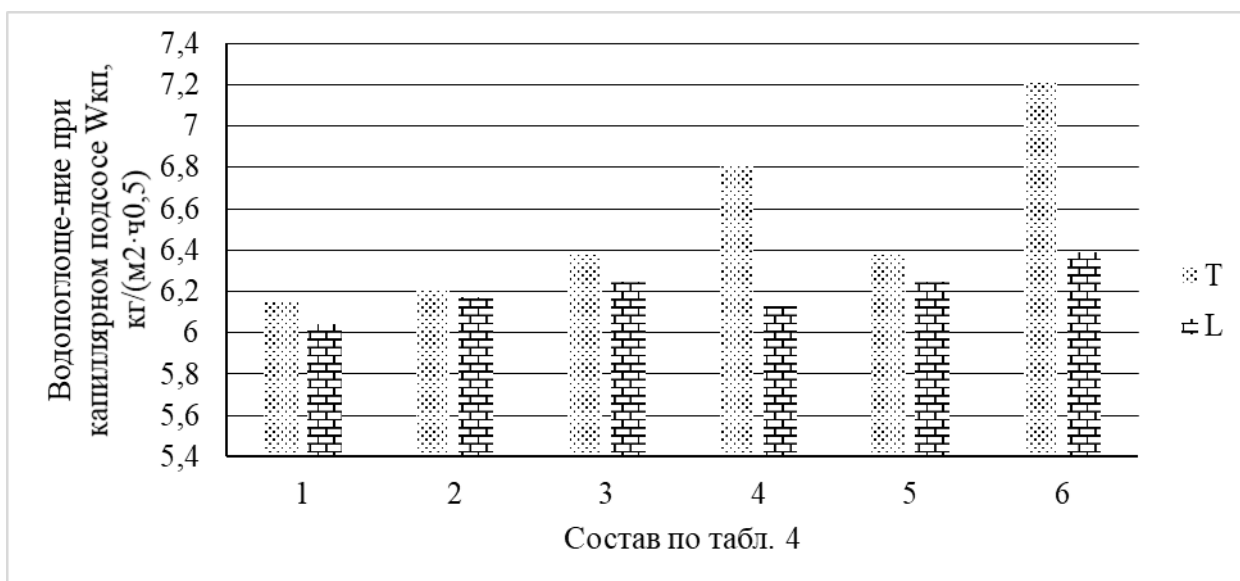


Рис. 3. Величина капиллярного подсоса представленных в табл.4 бетонов

Очевидно явное преимущество технологии формирования сечения при центрифугировании с использованием метода «раздельного» бетонирования с введением крупного заполнителя внутрь кольцевого сечения после его формирования с последующим уплотнением. Лучшие показатели присущи составу №1 в табл. 4, что опять подтверждает вывод о целесообразности исследования эффективности применения крупного заполнителя с уменьшенным содержанием фракции 5-10.

В табл. 5 представлены результаты измерения скорости прохождения ультразвукового импульса при сквозном и поверхностном прозвучивании представленных в табл. 4 бетонов.

Таблица 5 – Скорость ультразвука в образцах, м/с

№ состава	Способ формирования	Скорость при поверхностном прозвучивании v , м/с		Скорость при сквозном прозвучивании v , м/с	Соотношение скоростей v_{int}/v_{ext}
		Внешний слой, v_{ext}	Внутренний слой, v_{int}		
1 (40/60)	двухстадийное	5120	4956	4963	0,968
2 (50/50)		5110	4632	4738	0,906
3 (60/40)		5082	4576	4746	0,900

4 (40/60)	одностадий- ное	4940	4560	4835	0,923
5 (50/50)		4890	4372	4776	0,894
6 (60/40)		4842	4101	4367	0,847

Сопоставляя значения скоростей при поверхностном прозвучивании по внешней и внутренней грани образцов и сквозном прозвучивании через «середицу» образца (рис. 4), можно сделать следующие выводы:

- наиболее высокие значения скорости ультразвукового импульса характерны для технологии формирования сечения при центрифугировании с использованием метода «раздельного» бетонирования с введением крупного заполнителя внутрь кольцевого сечения после его формирования с последующим уплотнением;

- наименьшее различие в скоростях ультразвукового импульса, т.е. наилучшая однородность структуры бетона по сечению характерна для состава с соотношением фракций 5-10/10-20 мм соответственно 40% и 60%, что опять позволяет предположить возможную целесообразность применения крупного заполнителя с меньшим содержанием фракции 5-10 мм;

- соотношение v_{int}/v_{ext} скоростей ультразвукового импульса при поверхностном прозвучивании по внутренней (v_{int}) и внешней (v_{ext}) грани можно рассматривать как условный показатель однородности структуры бетона по сечению центрифугированного изделия.

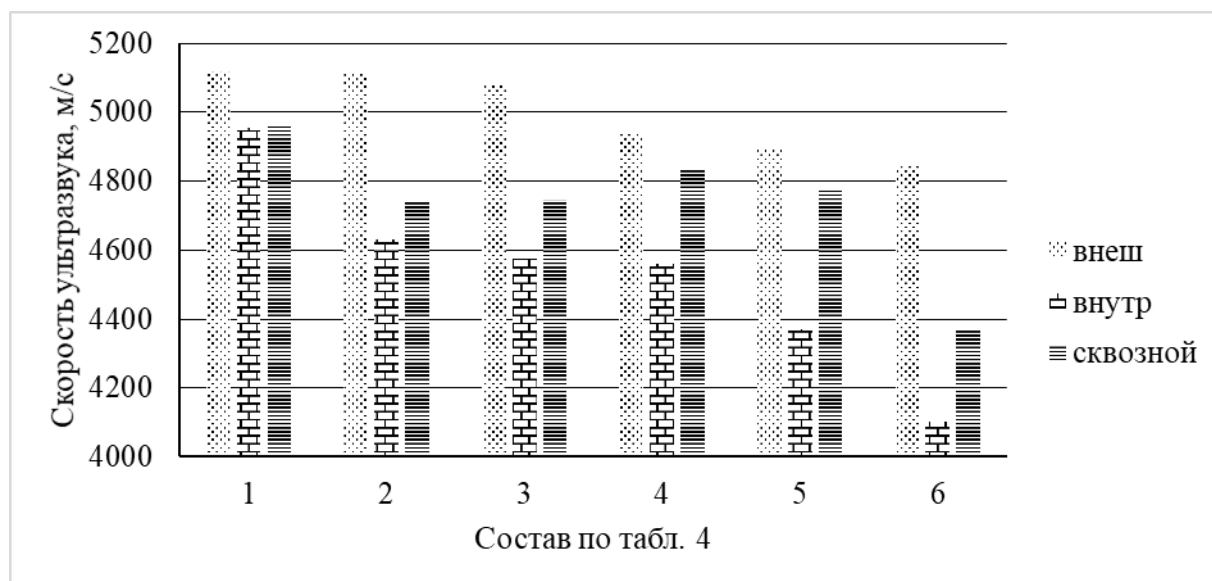


Рисунок 4. Соотношение скоростей прозвучивания сквозного, поверхностного внутреннего и внешнего слоев бетона

В табл. 6 представлены расчетные показатели прочностных и деформационных свойств исследованных бетонов. Значения показателей получены по ф. (1 – 4).

Таблица 6 – Значения конструктивных характеристик бетона опытных образцов центрифугированных железобетонных колонн кольцевого сечения

№ состава	Вид прозвучивания	Наименование характеристики					
		Двухстадийного формования			Одностадийного формования		
		Динамический модуль упругости E_d , ГПа	Начальный модуль упругости E_0 , ГПа	Прочность бетона $R = R_{pr}/0,8$, МПа/%	Динамический модуль упругости E_d , ГПа	Начальный модуль упругости E_0 , ГПа	Прочность бетона $R = R_{pr}/0,8$, МПа/%
1 (40/60)	Внешний слой	44,25	$\frac{36,77}{112,7^4}$	$\frac{54,6}{134,5^1}$	39,23	$\frac{32,60}{100^4}$	$\frac{40,6}{100^1}$
	Внутренний слой	39,53	$\frac{32,85}{119,3^5}$	$\frac{41,3}{147,0^2}$	33,14	$\frac{27,54}{100^5}$	$\frac{28,1}{100^2}$

	Сквозное прозвучивание	40,61	$\frac{33,75}{105,8^6}$	$\frac{44,1}{120,8^3}$	37,41	$\frac{31,09}{100^6}$	$\frac{36,5}{100^3}$
--	---------------------------	-------	-------------------------	------------------------	-------	-----------------------	----------------------

Примечания: 1-6 – в % относительно одностадийного формирования

Таким образом, при двухстадийном способе формирования центрифугированных кольцевых сечений отмечается улучшение всех конструктивных характеристик исследованных бетонов, уменьшение различия в физико-механических свойствах внешнего и внутреннего слоев, т.е. повышение однородности структуры и свойств бетона по сечению, что должно сопровождаться повышением несущей способности центрифугированных железобетонных колонн кольцевого сечения за счет изменения способа формирования кольцевого сечения на стадии изготовления по методу «раздельного» бетонирования, обеспечить некоторую экономию ресурсов за счет улучшения показателей прочностных и деформационных свойств центрифугированного бетона.

Выводы.

1. Показано преимущество формирования кольцевого сечения при центрифугировании по методу «раздельного» бетонирования, когда на первой стадии из исходной, в т.ч. мелкозернистой бетонной смеси формируется сечение, на второй стадии внутрь кольцевого сечения вводится крупный заполнитель и осуществляется окончательное формирование сечения посредством центрифугирования при расчетных для стадии уплотнения оборотах.
 2. Выявлено повышение при центрифугировании по методу «раздельного» от 20% до 47%, начального модуля упругости от 6 до 19% относительно одностадийного центрифугирования.
 3. Предложено рассматривать соотношение v_{int}/v_{ext} скоростей ультразвукового импульса при поверхностном прозвучивании по внутренней (v_{int}) и внешней (v_{ext}) грани центрифугированного кольцевого сечения как условный
-
-

показатель однородности структуры бетона по сечению центрифугированного изделия

Литература

1. Раджан Сувал Свойства центрифугированного бетона и совершенствование проектирования центрифугированных железобетонных стоек опор ЛЭП: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.23.05. Ростов-на-Дону, 1997. 24 с.
2. Штайерман Ю. Я. Центрифугированный бетон. Тифлис: Изд-во «Техника да Шрома», 1933. 107 с.
3. Маилян Л.Р., Стельмах С.А., Халюшев А.К., Холодняк М.Г., Щербань Е.М., Нажуев М.П. Совершенствование режимов формирования центрифугированных бетонных изделий кольцеобразного сечения // Инженерный вестник Дона, 2018, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4832.
4. Петров В.П. Технология и свойства центрифугированного бетона с комбинированным заполнителем для стоек опор контактной сети: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.23.05. Ростов-на-Дону, 1983. 24 с.
5. Романенко Е.Ю. Высокопрочные бетоны с минеральными пористыми и волокнистыми добавками для изготовления длинномерных центрифугированных конструкций: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.23.05. Ростов-на-Дону, 1989. 24 с.
6. Ахвердов И.Н. Вопросы теории центробежного формирования и уплотнения бетонной смеси. – Республиканское научно-техническое совещание: Технология формирования железобетонных изделий, 1979. С. 3-12.
7. Несветаев Г.В., Нажуев М.П., Халюшев А.К., Чернильник А.А., Кучеренко Д.Ю., Ганина А.А. Совершенствование технологии изготовления центрифугированных изделий за счет отдельного введения минеральных

компонентов бетонной смеси // Инженерный вестник Дона, 2019, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5742.

8. Несветаев Г.В., Халезин С.В. О прочности бетона с каркасной структурой // Интернет-журнал «Науковедение» Том 7, 2015, №3. // naukovedenie.ru/PDF/92TVN315.pdf. DOI: 10.15862/92TVN315.

9. Бычков М.В., Удодов С.А. Деформационные свойства легкого конструкционного самоуплотняющегося бетона / Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки, 2013, № 2 (29), С. 71-75.

10. Карпенко Н.И., Мухамедиев Т.А., Петров А.Н. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры. // Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986 – с. 7-25.

11. Кургин К.В. К расчету внецентренно-сжатых колонн из керамзитобетона. // Строительство – 2013: материалы научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2013 – с. 24-28.

12. Лихов З.Р. К расчету железобетонных изгибаемых элементов с комбинированным преднапряжением с учетом полных диаграмм деформирования материалов. // Строительство – 2003: материалы научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2003– с. 43-48.

13. Аль-Ахмади Мухаммед Ахмед Али. Свойства керамзитобетона и конструкций на его основе при предварительном напряжении и повторных нагрузениях: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.23.01. – Ростов-на-Дону, 2003. – 24 с.

14. EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings Management Centre: rue de Stassart, 36. B-1050 Brussels. 225 p.

15. Саламанова М.Ш., Исмаилова З.Х., Бисултанов Р.Г., Арцаева М.С. Влияние композиционного вяжущего на формирование физико-механических и эксплуатационных свойств фибробетона / Эффективные строительные композиты. Научно-практическая конференция к 85-летию заслуженного деятеля науки РФ, академика РААСН, доктора технических наук Баженова Ю.М. БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015, С. 592-598.
16. Несветаев Г.В., Кардумян Г.С. Прочность цементного камня с суперпластификаторами и органоминеральными модификаторами с учетом его собственных деформаций при твердении // Бетон и железобетон. 2013. № 5. С. 6-8.
17. 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.

References

1. 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]: avtoref. dis.... kand. tekhn. nauk: 05.23.05. Rostov-on-Don, 1997. 24 p.
2. Shtayerman Yu.Ya. Centrifugirovanny beton [Centrifuged concrete]. Tiflis: Izd-vo "Technika da Shroma", 1933. 107 p.
3. Mailyan L.R., Stel'makh S.A., Khalyushev A.K., Kholodnyak M.G., Shcherban' E.M., Nazhnev M.P. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4832.
4. 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]: avtoref. dis.... kand. tehn. nauk: 05.23.05. Rostov-on-Don, 1983. 24 p.
5. Romanenko E.Yu. Vysokoprochnye betony s mineral'nymi poristymi i voloknistymi dobavkami dlya izgotovleniya dlinnomernyh centrifugirovannykh konstrukciy [High-strength concretes with mineral porous and fibrous additives for the manufacture of long-length centrifuged structures]: avtoref. dis.... kand. tehn. nauk: 05.23.05. Rostov-on-Don, 1989. 24 p.
6. 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-tehnicheskoe soveshanie: Tehnologiya formovaniya zhelezobetonnykh izdeliy, 1979. pp. 3-12.
7. Nesvetaev G.V., Nazhnev M.P., Khalyushev A.K., Chernilnik A. A., Kucherenko D.U., Ganina A.A., Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5742.
8. Nesvetaev G.V., Khalezin S.V. Naukovedenie, 2015, Vol 7, №3. URL: naukovedenie.ru/PDF/92TVN315.pdf.
9. Bychkov M.V., Udodov S.A. Herald of Dagestan state technical university. Technical sciences, 2013, № 2 (29), pp. 71-75.
10. Karpenko N.I., Muhamediev T.A., Petrov A.N. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie betonnykh i zhelezobetonnykh konstrukcij. M.: Strojizdat, 1986. pp. 7-25.
11. Kurgin K.V. Stroitel'stvo 2013: materialy nauchno-prakticheskoy konferencii. Rostov-na-Donu: RGSU, 2013. pp. 24-28.
12. Lihov Z.R. Stroitel'stvo 2003: materialy nauchno-prakticheskoy konferencii. Rostov-na-Donu: RGSU, 2003. pp. 43-48.
13. Al'-Ahmadi Muhammed Ahmed Ali. Svoystva keramzitofibrobetona i konstrukcij na ego osnove pri predvaritel'nom napryazhenii i povtornykh nagruzheniyah [Properties keramzitobetona and designs based on it pre-tension and
-



repeated loading]: avtoref. diss. kand. tekhn. nauk: 05.23.01. Rostov-na-Donu, 2003. 24p.

14. EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings Management Centre: rue de Stassart, 36. B-1050 Brussels. 225 p.

15. Salamanova M.Sh., Ismailova Z.Kh., Bisultanov R.G., Arcaeva M.S. Effektivnye stroitel'nye kompozity. Nauchno-prakticheskaya konferenciya k 85-letiyu zaslužennogo deyatelya nauki RF, akademika RAASN, doktora tekhnicheskikh nauk Bazhenova Yu.M. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2015, pp. 592-598.

16. Nesvetaev G.V., Kardumyan G.S. Beton i zhelezobeton. 2013. №5. pp. 6-8

17. Pooya Alae, Bing Li. Engineering Structures. 2017. Vol. 145. pp. 305-321.