

## Рецептурно-технологические аспекты получения высококачественных центрифугированных бетонов

*А.А. Чернильник, Е.М. Щербань, С.А. Стельмах,  
С.В. Чебураков, Д.М. Ельшаева, Н.А. Доценко  
Донской государственный технический университет*

**Аннотация:** Рассмотрена возможность создания центрифугированных изделий кольцевого сечения с вариатропной структурой за счет введения в состав пористого заполнителя. Изучены различные способы введения крупного заполнителя с целью повышения однородности физико-механических свойств центрифугированных изделий. Рассматривается исследование влияния различных видов волокон фибры на физико-механические свойства центрифугированного бетона. Результаты физико-механических испытаний фибробетона показали, что наибольший эффект по пределу прочности при сжатии достигается при введении в состав металлической фибры. При этом деформации усадки ниже на 20 % в составе с базальтовой фиброй по сравнению с контрольным. Исследованные рецептурно-технологические приемы подтвердили свою эффективность и могут быть успешно применены в строительной практике.

**Ключевые слова:** центрифугированный бетон, фибра, фибробетон, крупный заполнитель, пористый заполнитель, вариатропная структура

Как эффективное средство уплотнения центрифугирование нашло применение при формировании железобетонных изделий, таких как опоры, трубы и иные элементы кольцевого сечения [1-4].

Рассмотрим некоторые рецептурно-технологические аспекты получения высококачественных центрифугированных бетонов.

Известно, что если поместить пластичную бетонную смесь во вращающуюся форму, то под действием нормального (радиального) давления она станет деформироваться – растекаться во все стороны. Это будет происходить до тех пор, пока не наступит равновесие между силами, вызывающими растекание смеси, и внутренним сопротивлением цементного теста сжатию. С увеличением скорости вращения формы из цементного теста начнет отжиматься вода и бетонная смесь будет уплотняться до тех пор, пока не приобретет свойства псевдотвердого тела, деформации которого проявляются в основном в виде упругого последействия [5].

---

В силу своих реологических свойств цементное тесто способно сопротивляться сжатию тем значительнее, чем меньше в нем свободной воды.

При передаче на цементное тесто нормального давления оно сразу же воспринимается водой, заключенной в межзерновом пространстве, в связи с чем в системе возрастает гидростатическое давление, под влиянием которого возникает фильтрация воды и одновременно уплотняется цементное тесто. В результате увеличивается сопротивление цементного теста сжатию и при определенных условиях восстанавливается равновесное состояние, характеризующееся прекращением фильтрационного процесса. С этого момента прессующее давление полностью передается на сольватированные зерна цемента и их дальнейшему сближению будет препятствовать пленочная вода [6, 7].

Прессующее давление от центробежной силы распределяется по толщине стенки неравномерно – от минимума на внутренней до максимума на наружной поверхности изделия. В связи с этим с увеличением прессующего давления сверх той величины, при которой достигается предельное уплотнение наружных слоев цементного теста, начинают уплотняться последующие слои, расположенные ближе к оси формы. Поэтому с увеличением прессующего давления в процессе центрифугирования достигается более равномерная плотность цементного теста по толщине стенки изделия [8].

Уплотнение бетонной смеси при центрифугировании сопровождается изменением водоцементного отношения, а вместе с этим и пористости бетона по толщине стенки изделия [9].

Таким образом, при уплотнении методом центрифугирования происходит разделение бетонной смеси на зоны по крупности зерен. Крупнозернистый конгломерат с большей массой перемещается к внешней

---

поверхности изделия, а с меньшей массой – соответственно ближе к внутренней. Именно эта разница в скорости дрейфа частиц различного размера обуславливает специфическое вариатропное строение свежеотформованного центрифугированного бетона, у которого внешний слой образован, в основном, крупным заполнителем с прослойкой цементного теста, а с приближением к внутренней поверхности постепенно возрастает содержание мелких частиц плотного заполнителя и цементного теста [10-13]. Управление этим процессом при получении трехслойных центрифугированных изделий из фибробетона возможно осуществить при соблюдении следующих условий:

- крупный заполнитель должен быть одной фракции;
- помимо плотного должен быть применен пористый заполнитель.

Введение пористого заполнителя с 50 % заменой плотного той же фракции изменит характер распределения зерен заполнителя по толщине стенки изделия, а центробежная сила, действующая пропорционально массе вращающегося твердого тела, будет влиять на формирование слоев в процессе уплотнения при центрифугировании [14-17].

Для подтверждения нашего предположения был выполнен расчет по действию центробежной силы на зерно плотного (гранит) и пористого (керамзитовый гравий) заполнителя. По результатам расчетов следует, что действие центробежной силы тем значительнее, чем больше радиус и средняя плотность зерна. В соответствии с этим изменяется и распределение зерен плотного и пористого заполнителя по сечению стенки изделия, образуя трехслойное кольцевое сечение с вариатропной структурой, в центральном слое которого располагается легкий конструкционный бетон.

Такая вариатропность повлияет на физико-механические свойства центрифугированного бетона по сравнению с той, какая была бы при

неравномерном распределении зерен плотного заполнителя, состоящего из смеси разных фракций по всему сечению элемента.

Центрифугирование бетона основывается на способности бетонной смеси внутри вращающейся формы стремиться к периферии формы под действием центробежных сил и уплотняться. Действие центробежной силы на зерно крупного заполнителя тем значительнее, чем больше радиус и средняя плотность зерна. В связи с этим зерна более крупных размеров становятся прижатыми к внешней поверхности изделия или конструкции, а более мелкие распределяются более близко к внутренней поверхности изделия. По этой причине центрифугированный бетон отличается от вибрированного тем, что зерна заполнителя неоднородно распределены по толщине изделия.

Эта неоднородность может снижать прочностные свойства центрифугированных бетонов. Помимо тщательного подбора состава бетона достижение максимальной плотности структуры можно получить при правильном выборе способа и режима формования. Поэтому особый научный интерес вызывает изучение путей совершенствования технологических способов при центрифугировании бетонной смеси.

Первый способ введения крупного заполнителя состоит в послойном формовании в процессе центрифугирования изделий: сначала вводится часть растворной смеси, состоящей из песка и цемента, и уплотняется, а затем крупный заполнитель фракции 5-10 мм, и также уплотняется. Таким образом чередуются несколько слоев. Второй способ заключается в перемешивании всех исходных компонентов и введении всей части бетонной смеси в форму, после чего производится загрузка, распределение и уплотнение. В процессе формования регулирование скорости вращения формы с наружным диаметром 210 мм изменяется от 200 до 1500 об/мин, создавая прессующее давление на бетонную смесь  $p = 1,04 \text{ кгс/см}^2$ .

---

Для исследования физико-механических свойств центрифугированное изделие с наружным диаметром 205 мм и толщиной стенки 40 мм распиливали на 8 сегментных частей, каждую из которых прозвучивали с помощью измерителя времени и скорости распространения ультразвука «Пульсар-2.2».

Для исследования механических свойств центрифугированного фибробетона в качестве волокон для дисперсного армирования в составах бетонов исследовалась стальная, базальтовая и полипропиленовая фибра. Базовый состав смеси центрифугированного бетона с проектным классом В40 П1 (осадка конуса 1-3 см) на 1 м<sup>3</sup> включает в себя, кг: гранитный щебень фракции 5-10 мм – 1274, песок – 658, цемент – 398, вода – 175.

Деформации усадки для образцов состава 1-К (контрольный), 2-С (стальная фибра), 3-Б (базальтовая фибра) и 4-П (полипропиленовая) в возрасте 40 сут. составили соответственно:  $\varepsilon_{cs1}=40,3 \cdot 10^{-5}$ ,  $\varepsilon_{cs1}=35,2 \cdot 10^{-5}$ ,  $\varepsilon_{cs1}=32,6 \cdot 10^{-5}$  и  $\varepsilon_{cs1}=37,5 \cdot 10^{-5}$ .

На 20 % меньше усадочные деформации по сравнению с контрольным составом показал состав 3-Б с базальтовой фиброй. Вероятно, это связано с хаотичным прошиванием цементной матрицы в разных направлениях и ее равномерным распределением [18, 19].

Установлено, что в результате введения различных видов волокон изменяются показатели средней плотности и параметры поровой структуры бетонов. Так для центрифугированного фибробетона с добавкой металлических волокон (2-С) средняя плотность увеличилась на 29 кг/м<sup>3</sup>, а предел прочности при сжатии образцов-кубов вырос на 15 % по сравнению с контрольным составом. В то же время при введении в состав базальтовой фибры (3-Б) средняя плотность увеличилась на 11 кг/м<sup>3</sup>, а предел прочности при сжатии образцов-кубов практически не изменился. Вместе с тем состав на полипропиленовой фибре (4-П) показал незначительное падение предела

---

прочности при сжатии на 5 %. Вероятно, это связано с незначительным повышением водопотребности, а также с неравномерным распределением фибры по объему.

Результаты физико-механических испытаний фибробетона показали, что наибольший эффект по пределу прочности при сжатии достигается при введении в состав металлической фибры. При этом деформации усадки ниже на 20 % в составе с базальтовой фиброй по сравнению с контрольным.

Таким образом, исследованные рецептурно-технологические приемы подтвердили свою эффективность и могут быть успешно применены в строительной практике.

### Литература

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

---



5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Маилян Л.Р., Стельмах С.А., Халюшев А.К., Холодняк М.Г., Щербань Е.М., Нажуев М.П. Совершенствование режимов формования центрифугированных бетонных изделий кольцеобразного сечения // Инженерный вестник Дона, 2018, №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4832](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4832).

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

10. Корянова Ю.И., Несветаев Г.В. Влияние условий твердения бетона с двухстадийным расширением на деформативно-прочностные показатели // Наукоедение. Том 7, № 5(30), 2015 URL: [naukovedenie.ru/PDF/129TVN515.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/129TVN515.pdf).

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. Явруян Х.С., Холодняк М.Г., Шуйский А.И., Стельмах С.А., Щербань Е.М. Влияние некоторых рецептурно-технологических факторов на свойства неавтоклавного газобетона // Инженерный вестник Дона, 2015, № 4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3431.

19. Alexander Halyushev, Mikhail Holodnyak, and Muhuma Nazhuyev Effect of caustic soda on the intensity of gassing in the production of non-autoclaved aerated concrete // MATEC Web of Conferences. ICMTMTE, 2017, Vol. 129 URL: [matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/43/mateconf\\_icmtmte2017\\_05012.pdf](http://matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/43/mateconf_icmtmte2017_05012.pdf).

### References

1. Nazhuyev 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](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4313).

2. Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Serdyukov K.V., Pestrikov M.M., Yanovskaya A.V. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2017, №10. pp. 15-20.

3. Mailyan L.R., Stel'makh S.A., Holodnyak M.G., Shcherban' E.M. naukovedenie, Vol. 9, №4 (2017) URL: [naukovedenie.ru/PDF/71TVN417.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/71TVN417.pdf).

4. 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.

5. Mailyan L.R., Stel'makh S.A., Holodnyak M.G., Shcherban' E.M. Scientific bulletin SevKavGTI. 2017. №3 (30). pp. 134-137.

6. Bychkov M.V., Udodov S.A. / Herald of Dagestan state technical university. Technical sciences, 2013, № 2 (29), pp. 71-75.

7. 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.

8. Mailyan L.R., Stel'makh S.A., Khalyushev A.K., Kholodnyak M.G., Shcherban' E.M., Nazhuyev M.P. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, № 2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4832](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4832).

---

9. 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 zhelezobetonnyh izdeliy, 1979. pp. 3-12.

10. Koryanova Yu.I., Nesvetaev G.V. Naukovedenie. Vol. 7, № 5(30), 2015 URL: [naukovedenie.ru/PDF/129TVN515](http://naukovedenie.ru/PDF/129TVN515).

11. Romanenko E.Yu. Vysokoprochnye betony s mineral'nymi poristymi i voloknistymi dobavkami dlya izgotovleniya dlinnomernykh centrifugirovannykh konstrukciy [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.

12. Petrov V.P. Tehnologiya i svoystva centrifugirovannogo 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.



16. 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.

17. Kholodnyak M.G., Stel'makh S.A., Mailyan L.R., Shcherban' E.M., Nazhuyev M.P. Construction and Architecture (2017) Vol. 5. Issue 4 (17). pp. 229-233.

18. Yavruyan Kh.S., Holodnyak M.G., Shuyskiy A.I., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3431](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3431).

19. Alexander Halyushev, Mikhail Holodnyak, and Muhuma Nazhuyev MATEC Web of Conferences. ICMTMTE, 2017, Vol. 129 URL: [matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/43/mateconf\\_icmtmte2017\\_05012.pdf](http://matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/43/mateconf_icmtmte2017_05012.pdf).