

## Исследование реологических свойств цементных композиций с комплексом добавок

*М.К. Ахматов, М.П. Кочергина, Д.К. Тимохин,  
Ю.Г. Иващенко, С.А. Евстигнеев, Г.А. Корольков*

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.*

**Аннотация:** В статье изложены результаты исследования реологических свойств цементных композиций с пластификатором на поликарбоксилатной основе и каменной мукой из карбонатных пород Саратовской области.

**Ключевые слова:** цемент, реологическая матрица, порошково-активированные бетоны, суперпластификатор, гиперпластификатор, тонкодисперсная добавка, отход камнедробления, каменная мука, водоцементное соотношение, водоредуцирующий эффект.

К современным высококачественным бетонам относят следующие их разновидности: высокопрочные и ультровысокопрочные бетоны; самоуплотняющиеся и самонивелирующиеся бетоны; реакционно-порошковые и порошковые пластифицированные бетоны, включая дисперсно-армированные.

В соответствии с концепцией High Performance Concrete (HPC), которая была сформулирована канадским ученым П.К. Айчином в 1986 году с более поздней практической реализацией, бетоном нового поколения можно назвать высокофункциональный бетон. Их отличают высокий уровень функциональных и эксплуатационных характеристик, долговечность, технологичность и возможности ресурсо-энергосбережения, экономии цемента.

Порошково-активированные суперпластифицированные бетоны нового поколения на цементных вяжущих, называемые Reactive Powder Concrete (RPC), которые отличаются как высокими технологическими, так и эксплуатационными характеристиками представляют большой интерес для строительной отрасли [1-3]. Для таких видов бетонов характерно

относительно высокое содержание минеральных дисперсных наполнителей, которые, в сочетании с цементом и современными пластификаторами [4,5], способствуют экономии цемента, улучшают реологию, препятствуют расслоению и водоотделению бетонной смеси, способствуют повышению физико-механических характеристик бетона.

В настоящее время в области разработки рецептур порошково-активированных бетонов стоит важная задача в получении новых данных, что поспособствует более широкому их внедрению.

В соответствии с положениями полиструктурной теории композиционных материалов В.И. Соломатова [6], согласно которой проектирование композиционных материалов достаточно (с инженерной точки зрения) проводить на двух масштабных уровнях: микро- и макроструктуры, где критериями оптимизации на микроуровне выбирают подвижность смеси, на макроуровне – прочностные характеристики.

Порошково-активированные песчаные и щебеночные бетоны являются многокомпонентными системами, где в дополнении к цементу назначают дисперсные компоненты, как минимум, двух размерных масштабных уровней в сочетании с высокоэффективными пластификаторами нового поколения [7-9].

В настоящее время определены требования к тонкодисперсным наполнителям для RPC, которые регламентируются стандартами. При проектировании составов порошково-активированных бетонов в качестве тонкодисперсных наполнителей в основном используют молотый кварцевый песок и порошки из горных пород – каменную муку (известняковую, гранитную и др.) как реологически-активную составляющую, а в качестве реакционно-активных добавок – микрокремнезем, дегидратированный каолин, белую сажу и др.

---

Согласно сведениям из научно-технической литературы, в порошково-активированных бетонах выделяют три реологические матрицы в зависимости от масштабного уровня дисперсности [10]:

- 1-ого рода, состоящая из цемента, молотого кварцевого песка или каменной муки, микрокремнезема, суперпластификатора и воды;
- 2-ого рода, состоящая из матрицы 1-ого рода с тонким песком;
- 3-ого рода (растворная часть бетона), состоящая из матриц 1-ого и 2-ого рода с включением среднего или крупного песка.

Матрица 1-ого рода в порошковых бетонах обеспечивает условия для беспрепятственного взаимного перемещения частиц тонкого песка относительно друг друга. Реологическая матрица 1-ого рода, включающая цемент, дисперсный наполнитель – каменную муку и пластификатор на поликарбоксилатной основе является перспективной основой для получения порошково-активированных бетонов с возможностью вовлечения региональных ресурсов в виде отходов камнедробления.

Поволжский регион располагает сырьевой базой карбонатных горных пород, при дроблении которых в достаточно большом количестве образуются отсеvy – фракции менее 5 мм, каменная мука из которых может быть весьма эффективно использована в качестве дисперсных наполнителей в составах порошково-активированных бетонов. Кроме того, вопрос утилизация отходов такого рода является весьма актуальным и важным с точки зрения энергосбережения и ресурсосбережения.

Исходя из современных представлений о формировании структуры и свойств порошково-активированных бетонов, была поставлена задача: *исследовать свойства цементной матрицы первого рода, которая включает цемент, каменную муку Ершовского месторождения Саратовской области, поликарбоксилатный пластификатор марки КРАТАСОЛ FC и воду.*

На начальном этапе проведена оценка «растекаемости» цемента без пластификатора при разных показателях водоцементного соотношения (В/Ц): 0,48; 0,52; 0,58; 0,6 (рисунок 1). В процессе исследования использовался цемент марки ЦЕМ I 42,5 Н АО «Волга цемент», суперпластификатор «КРАТАСОЛ FC», соответствующий ГОСТ 24211, EN934-2 (АО «Пигмент», г. Тамбов).

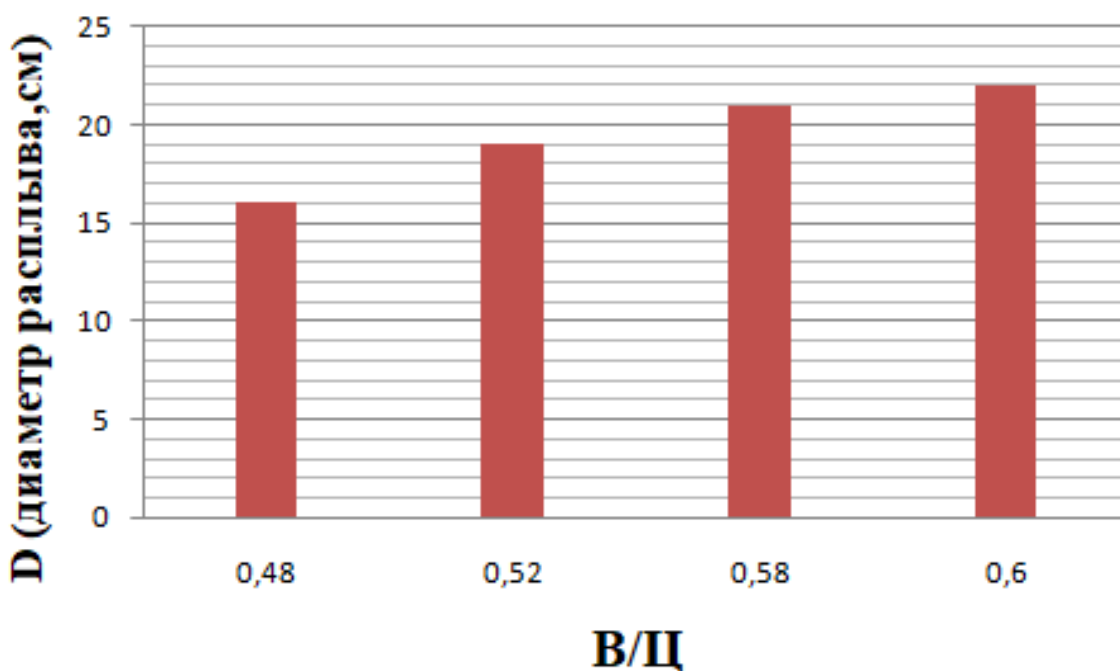


Рис. 1. –Зависимость диаметра расплыва системы «цемент-вода» от В/Ц соотношения

Оценка пластифицирующего и водоредуцирующего действия добавки «КРАТАСОЛ FC» проводилась относительно контрольного бездобавочного состава с В/Ц =0,6, при котором диаметр расплыва показал значение 230 мм. Контроль консистенции смесей осуществлялся по самопроизвольному диаметру расплыва конуса (Др) от встряхивающего столика на стекле (конуса Хегерманна по ГОСТ 310.4-81). Результаты эксперимента представлены на рисунке 2.

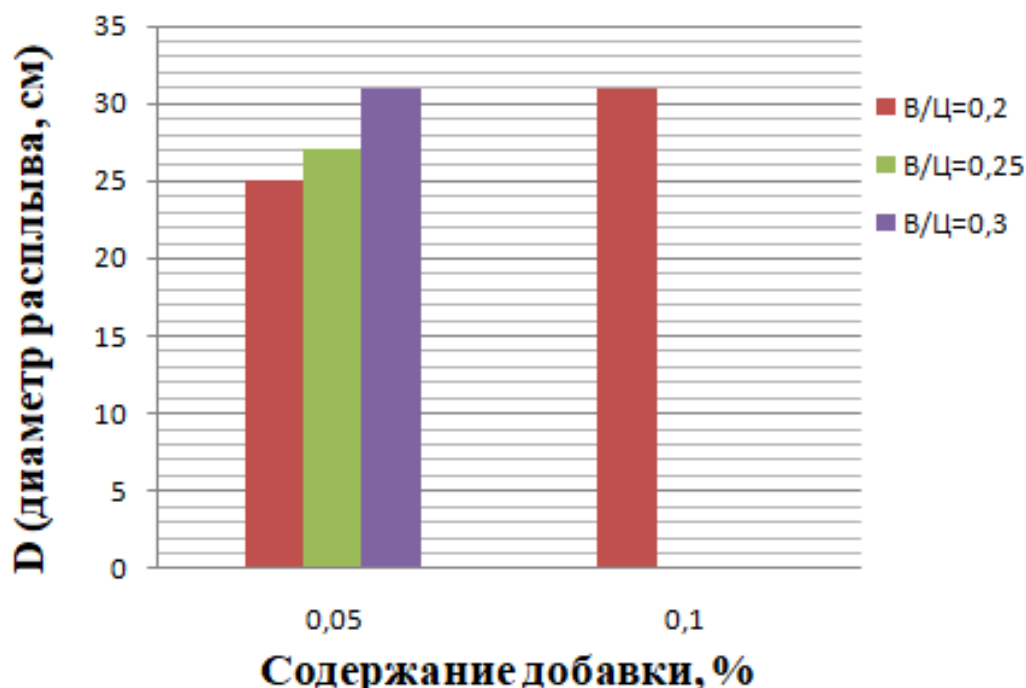


Рис. 2. – Зависимость диаметра распыла системы «цемент+вода+ КРАТАСОЛ FC» от процентного содержания добавки по массе связующего при различных показателях В/Ц

В соответствии с рекомендациями производителя добавка «КРАТАСОЛ FC», которая представляет собой тонкодисперсный порошок и характеризуется как суперпластифицирующая и водоредуцирующая добавка, вводилась в смесь вместе с последней третью воды затворения в диапазоне 0,05-0,3% по отношению к массе цемента.

Механизмы действия различного рода пластификаторов в большей степени известны, которые зависят как от химической природы, так и пространственной структуры полимера. Действие поликарбоксилатных суперпластификаторов известно и определяется совокупностью электростатического и так называемого стерического эффектов, достигаемого боковыми гидрофобными полиэфирными цепями молекулы поликарбоксилатного эфира. При этом существуют различные методики оценки суперпластификаторов, одна из которых заключается в применении

показателя снижения расхода воды до равнозначного по реологическому показателю состояния.

Результаты эксперимента показали, что в композициях на основе цемента марки ЦЕМ I 42,5 Н:

- супер пластифицирующая и водоредуцирующая добавка марки «КРАТАСОЛ FC» при содержании от 0,05 до 0,01 % по массе цемента обеспечивает при В/Ц = 0,2 - 0,3 расплывы суспензий диаметром 250-310.

- водоредуцирующий эффект добавки проявляется в снижении содержания воды в 2-2,5 раза;

- рациональное содержание добавки составляет 0,05 % по массе цемента, что соответствует В/Ц=0,25 и диаметру расплыва суспензии 260 мм, что отвечает требованиям предъявляемым к пластификаторам для рецептур бетонов на порошковой связке (обеспечение диаметра расплыва в пределах 260–350 мм при В/Ц (В/Т) не более 0,18 (0,2)).

Далее проводилась оценка «растекаемости» суспензий из порошков: цемента и каменной муки. Анализ научно-технической литературы показывает, что в рецептурах высокопрочных бетонов нового поколения, где используются молотые горные породы особенно важно учитывать дисперсность каменной муки. В ряде работ показано и установлено, что например рациональная дисперсность кварцевой муки составляет 3 000 – 4 000 см<sup>2</sup>/г. Помимо кварцевых тонкодисперсных наполнителей успешно применяются карбонатные породы, зерна различных фракций которых могут выполнять как структурно-реологическую, так и матрично-наполняющую функции.

Каменную муку (рисунок 3) получали путем помола отсевов дробления доломитизированного известняка в лабораторной шаровой мельнице до удельной поверхности  $S_{уд}=3000$  см<sup>2</sup>/г, удельную поверхность которой определяли с помощью прибора ПСХ-12, предназначенного для измерения

---

данных параметров тонкодисперсных порошков общепринятым методом газопроницаемости. В таблицах 1 и 2 представлен результат количественного химического анализа карбонатной горной породы (2 пробы).



Рис. 3 - Фото щебня и отсева дробления доломитизированного известняка

Кроме этого исследования показали, что Ершовский доломитизированный известняк по показателю водопоглощения, после выдержки в воде в течение 48 ч ( $w < 2\%$ ) относится к I категории, что предопределяет использование отсева его дробления для получения каменной муки, как реологически активной добавки.

Таблица № 1

Количественный химический анализ карбонатной горной породы (проба №1)

Количественный анализ		Количественный анализ	
Компонент	Концентрации	Элемент	Концентрации
MgCO <sub>3</sub>	5,6	12Mg	1,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,6	13Al	0,85
SiO <sub>2</sub>	0,5	14Si	0,22
SO <sub>4</sub>	0,2	16S	0,07
CaCO <sub>3</sub>	91,7	20Ca	36,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,27	26Fe	0,19
CuO	0,15	19Cu	0,12

Таблица № 2

Количественный химический анализ карбонатной горной породы (проба №2)

Количественный анализ		Концентрации	
Компонент	Концентрации	Элемент	Концентрации
MgCO <sub>3</sub>	25,36	12Mg	7,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,29	13Al	0,68
SiO <sub>2</sub>	0,4	14Si	0,19
SO <sub>4</sub>	0,12	16S	0,04
CaCO <sub>3</sub>	72	20Ca	28,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4	26Fe	0,2
CuO	0,2	19Cu	0,17

В таблице 3 представлены составы цементных композиций и соответствующие показатели диаметра их расплыва, где содержание суперпластификатора 0,05 % по массе порошка при В/Ц = 0,25.

Таблица № 3

Составы исследуемых цементных композиций и диаметр их расплыва

Наименование состава	Цемент, г	Каменная мука, г	Диаметр расплыва суспензии, мм
Контрольный	250	-	270
№1	225	25	270
№2	200	50	280
№3	175	75	300
№4	150	100	310
№5	125	125	330



В научно-технической литературе имеются следующие рекомендации при исследовании и оценке подобных систем, где в первую очередь в исследуемых суспензиях «цемент: каменная мука» соотношение по массе должно быть 1:0,5 и 1:1 (рисунок 4).

если распылы такой суспензии и цементной суспензии с каменной мукой будут одинаковы при равном количестве воды	мука не ухудшает способности цемента разжижаться под действием суперпластификатора
если при одинаковых распылах цементно-минеральная суспензия потребует меньше количество воды	мука усиливает действие суперпластификатора и является наиболее приемлемой в качестве реологически-активной добавки
если цементно-минеральная суспензия потребует большое количество воды для одинакового распыла с цементной	использование такой муки становится возможным лишь в том случае, если возрастание расхода воды не превышает 10-15% по сравнению с цементной

Рис. 4 - Интерпретация выводов по влиянию каменной муки на свойства цементных суспензий [9]

Экспериментальные данные, представленные в таблице 3, показывают, что при одинаковых распылах цементно-минеральная суспензия с Ершовской каменной мукой потребует меньшего количества воды, вероятно, усиливая действие суперпластификатора, что позволяет отнести данный тонкодисперсный компонент к группе приемлемых в качестве реологически-активных добавок.

В дополнении к проведенным исследованиям, были получены экспериментальные данные с использованием в составах цементных суспензий Ершовской каменной муки и пластификатора марки

«Семmix – СемThermo» при соотношении цемент/мука = 1:0,5 и 1:1 (рисунок 5). Результаты данного исследования также показали, что при одинаковых распылах цементно-минеральная суспензия потребует меньшего количества воды, что является своего рода подтверждением предыдущих выводов.

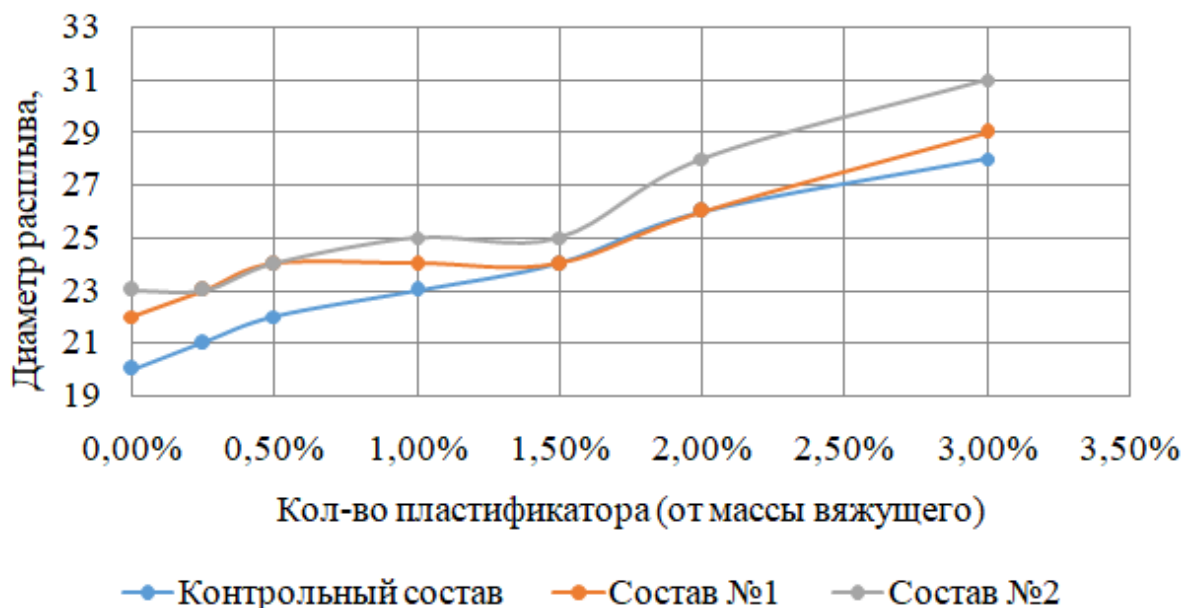


Рис. 5. – Зависимость диаметра распыла суспензий от процентного содержания пластификатора и минеральной добавки (состав №2)

Таким образом, полученные экспериментальные данные свидетельствует об эффективности комплекса Ершовская каменная мука и суперпластификатор марки «КРАТАСОЛ FC» для цементных композиций, который может быть рассмотрен в рецептурах порошково-активированных бетонов.

### Литература

1. Калашников В.И., Тараканов О.В., Володин В.М., Ерофеева И.В., Абрамов Д.А. Бетоны переходного и нового поколений. Состояние и перспективы // Современные проблемы науки и образования, 2015, № 2-1. URL: [science-education.ru/ru/article/view?id=20386](http://science-education.ru/ru/article/view?id=20386).

2. Баженов Ю. М. Технология бетонов XXI века // Академические чтения РААСН. Новые научные направления строительного материаловедения. Часть 1. Белгород. 2005. С. 9–20.

3. Баженов Ю.М., Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы // Строительные материалы. 2014. № 3. С. 6–14.

4. Dugat J., Roux N., Bernier G. Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes. Materials and Structures. 1996. Vol. 29. Pp. 233-240.

5. Dallaire E., Bonneau O., Lachemi M., Aitsin P.-C. Mechanical Behavior of Consined Reactive Powder Concrete // American Society of Civil Engineers Materials Engineering Coufernce. Washington. 1996. Vol. 1. Pp. 555-563.

6. Соломатов В.И., Выровой В.Н., Бобрышев А.Н. и др. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов. Ташкент: Изд-во ФАН, 1991. с. 342.

7. Коровкин М.О., Ерошкина Н.А., Саденко С.М., Пузырёв О.В. Свойства мелкозернистого бетона с инертной минеральной добавкой и суперпластификатором. Инженерный вестник Дона, 2022, №7. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7823](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7823).

8. Коровкин М.О., Гринцов Д.М., Ерошкина Н.А. Рациональное применение инертных минеральных добавок в технологии бетона // Инженерный вестник Дона. 2017, № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4361](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4361).

9. Енджиевская И.Г., Демина А.В., Енджиевский А.С., Дубровская С.Д. Оценка взаимодействия добавок в бетоне // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. № 24(3). С. 128-137.

10. Калашников В. И., Тараканов О. В., Кузнецов Ю. С., Володин В. М., Белякова Е. А. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-

---

порошковых смесей. Инженерно-строительный журнал. 2012. № 8 (34). С. 47–53.

### References

1. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Volodin V.M., Erofeeva I.V., Abramov D.A. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, № 2-1 URL: [science-education.ru/ru/article/view?id=20386](http://science-education.ru/ru/article/view?id=20386).
2. Bazhenov Ju. M. *Akademicheskie chteniya RAASN. Chast' 1*. Belgorod. 2005. pp. 9–20.
3. Bazhenov Ju.M., Chernyshov E.M., Korotkih D.N. *Stroitel'nye materialy*. 2014. № 3. pp. 6–14.
4. Dugat J., Roux N., Bernier G. *Materials and Structures*. 1996. Vol. 29. pp. 233-240.
5. Dallaire E., Bonneau O., Lachemi M., Aitsin P.-C. *American Society of Civil Engineers Materials Engineering Conference*. Washington. 1996. Vol. 1. pp. 555-563.
6. Solomatov V.I., Vyrovoy V.N., Bobryshev A.N. i dr. *Polistrukturnaja teorija kompozicionnyh stroitel'nyh materialov*. [A polystructural theory of composite building materials]. Tashkent: Izd-vo FAN, 1991. 342 p.
7. Korovkin M.O., Eroshkina N.A., Sadenko S.M., Puzyrjov O.V. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2022, №7. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7823](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7823).
8. Korovkin M.O., Grincov D.M., Eroshkina N.A. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2017, № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4361](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4361).
9. Endzhievskaja I.G., Demina A.V., Endzhievskij A.S., Dubrovskaja S.D. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2022. № 24(3). pp. 128-137.
10. Kalashnikov V.I. *Stroitel'nye materialy*. 2012. № 10. pp. 70-72.