

УДК: 691.32, 544.774
DOI: 10.52409/20731523_2023_3_45
EDN: FCPOKY



Функционализированный минеральный наполнитель – эффективный модификатор цементных бетонов

А.Ю. Беляков¹, О.В. Хохряков¹, В.Г. Хозин¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Минеральные наполнители и поверхностно-активные вещества (пластификаторы) позволяют регулировать реологические свойства бетонных смесей, повышать физико-механические показатели бетонов, а также снижать расход цемента в них. Однако самым распространённым способом остается введение химических добавок в состав бетонных смесей с водой затворения, а применение минеральных наполнителей (пуццолановых, гидравлических, инертных) в реальной практике менее распространено.

Альтернативой разделному применению пластификаторов (и других химических добавок) и наполнителей может стать принудительное «закрепление» первых на поверхности минеральных частиц при их совместном помоле. Полученные таким способом функционализированные наполнители могут использоваться в качестве модифицирующих добавок в цементные бетоны, превосходящих по эффективности известные органоминеральные добавки.

В статье рассмотрено влияние функционализации суперпластификаторами минеральных наполнителей различной химической природы на подвижность цементно-минеральных суспензий и бетонных смесей, на физико-механические свойства тяжелых бетонов.

Цель исследования состоит в получении функционализированных наполнителей, обеспечивающих повышенную эффективность суперпластификаторов в бетонных смесях. Для достижения цели ставились следующие задачи:

1. Установить предельно-эффективные концентрации суперпластификаторов в цементно-водных суспензиях;
2. Определить подвижности цементно-минеральных суспензий и обоснование эффективности применения функционализированных наполнителей;
3. Исследовать распределение частиц по размерам в функционализированных наполнителях;
4. Изучить влияние функционализации наполнителей на водопотребность бетонных смесей и прочность бетона.

Результаты. Обоснован способ повышения эффективности действия суперпластификаторов в минерально-водных суспензиях путем функционализации минеральных наполнителей. В тяжелых цементных бетонах он позволяет существенно повысить технологические и физико-механические свойства.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в повышении прочностных показателей бетонов с применением функционализированных наполнителей, полученных из изопластичных бетонных смесей, что позволяет сократить расход портландцемента без снижения физико-механических свойств бетона.

Ключевые слова: функционализированный наполнитель, суперпластификатор, пластифицирующая способность, цементный бетон, модификатор бетона.

Для цитирования: Беляков А.Ю., Хохряков О.В., Хозин В.Г. Функционализированный минеральный наполнитель – эффективный модификатор цементных бетонов // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с.45-56, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_45, EDN: FCPOKY

Functionalized mineral filler is an effective modifier for cement concrete

A.Yu. Belyakov¹, O.V. Khokhryakov¹, V.G. Khozin¹
¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* Mineral fillers and surfactants (plasticizers) make it possible to regulate the rheological properties of concrete mixtures, increase the physical and mechanical properties of concrete, and also reduce the consumption of cement in them. However, the most common method remains the introduction of chemical additives into the composition of concrete mixtures with mixing water, and the use of mineral fillers (pozzolanic, hydraulic, inert) in practice is less common.

An alternative to the separate use of plasticizers (and other chemical additives) and fillers can be the forced “fixation” of the former on the surface of mineral particles when they are ground together. Functionalized fillers obtained in this way can be used as modifying additives in cement concrete, superior in efficiency to known organomineral additives.

The article examines the effect of functionalization of mineral fillers of various chemical nature with superplasticizers on the mobility of cement-mineral suspensions and concrete mixtures, and on the physical and mechanical properties of heavy concrete.

The purpose of the study is to obtain functionalized fillers that provide increased efficiency of superplasticizers in concrete mixtures. To achieve the goal, the following tasks were set:

1. To establish the maximum effective concentrations of superplasticizers in cement-water suspensions;
2. To determine the mobility of cement-mineral suspensions and justify the effectiveness of using functionalized fillers;
3. To investigate the particle size distribution in functionalized fillers;
4. To study the effect of functionalization of fillers on the water requirement of concrete mixtures and the strength of concrete.

Results. A method for increasing the efficiency of superplasticizers in mineral-water suspensions by functionalizing mineral fillers has been substantiated. In heavy cement concrete, the method can significantly improve the technological and physical-mechanical properties.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry is to increase the strength properties of concrete using functionalized fillers obtained from isoplastic concrete mixtures, which allows reducing the consumption of Portland cement without reducing the physical and mechanical properties of concrete.

Key words: functionalized filler, superplasticizer, plasticizing ability, cement concrete, concrete modifier.

For citation: Belyakov A.Yu., Khokhryakov O.V., Khozin V.G. Functionalized mineral filler is an effective modifier for cement concrete // News KSUAE, 2023, № 3(65), p.45-56, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_45, EDN: FCPOKY

1. Введение

В бетонах главным и наиболее дорогостоящим, энерго- и ресурсозатратным компонентом является портландцемент, поэтому доминирующей тенденцией является снижение клинкероёмкости в производстве цемента. Наиболее результативным является производство цемента низкой водопотребности (ЦНВ) [1], превосходящих по всем техническим показателям все промышленные портландцементы мировых производителей при замене до 80 % клинкера на минеральные наполнители [2–4]. Также возможно повышение реакционной способности портландцемента при его механоактивации с минеральными наполнителями [5], однако данный способ менее эффективен.

Существует и другое направление по снижению клинкероёмкости – использование в составах бетонов наполнителей природного и техногенного происхождения. В современном строительстве бетоны нового поколения [6,7] производят с добавлением комплекса поверхностно-активных веществ (ПАВ) с минеральными наполнителями [8].

Эффективностью влияния минеральных наполнителей в цементных бетонах занимаются во многих странах [9–11], однако внимание уделяется в основном высокопрочным бетонам [12,13] и, в меньшей степени, бетонам низких классов по прочности, несмотря на их более широкое распространение.

Комплексные органоминеральные добавки (ОМД), получаемые смешением тонкомолотых минеральных пород или техногенных отходов с химическими модификаторами [14,15], позволяют упростить процесс приготовления многокомпонентных бетонных смесей, так как ПАВ вводятся совместно с минеральными наполнителями. Применение ОМД также перспективно [16], так как минеральные наполнители в комплексе с ПАВ способствуют повышению плотности и прочности цементного камня [17,18].

По мнению автора [19], процесс связывания воды является разновидностью гидратации частиц вяжущего, протекающий в две стадии. Первоначально под влиянием поверхностных сил разрываются первичные водородные связи между молекулами воды, а на второй стадии они вступают в водородную связь с кислородными и гидроксильными группами на поверхности частиц.

Авторы [2] предполагают, что полярные ПАВ, обладая на 2-3 порядка большей молекулярной массой, чем вода, в процессе теплового движения вытесняют ее молекулы из плотных адсорбционных слоев Штерна. Вытесненные молекулы воды вновь приобретают подвижность свободного объемного состояния, пластифицируя минеральную систему. В ЦНВ молекулы ПАВ посажены на поверхность портландцемента, препятствуя образованию адсорбционного слоя Штерна, сохраняя пластифицирующую способность пластификаторов в полном объеме.

Применение функционализированных наполнителей (ФНП) основано на схожем механизме пластификации, но функцию носителей химических добавок выполняют минеральные наполнители. В работе [20] подробно рассмотрено усиление пластифицирующего эффекта в различных минеральных системах при помоле сухих пластификаторов с минеральными порошками, по сравнению с введением пластифицирующих веществ с водой затворения. Важным открытием стало то, что большинство минеральных порошков, приведенных в исследовании, обладают лучшей совместимостью с пластифицирующими добавками по сравнению с цементами.

Цель исследования состоит в получении функционализированных наполнителей, обеспечивающих повышенную эффективность суперпластификаторов в бетонных смесях. Для достижения цели ставились следующие задачи:

1. Установить предельно-эффективные концентрации суперпластификаторов в цементно-водных суспензиях;
2. Определить подвижности цементно-минеральных суспензий и обоснование эффективности применения функционализированных наполнителей;
3. Исследовать распределение частиц по размерам в функционализированных наполнителях;
4. Изучить влияние функционализации наполнителей на водопотребность бетонных смесей и прочность бетона.

2. Материалы и методы

Объектом исследования были выбраны активные и инертные минеральные наполнители природного и техногенного происхождения, подготовленные из следующих сырьевых материалов:

Известняк Камаевского карьера (г. Менделеевск) фр. 5-40 мм, маркой по дробимости 400.

Известняк Гальянского карьера (г. Нижний Тагил) фр. 0-5 мм, маркой по дробимости 1200.

Известняк Тургоякского карьера (г. Миньяр) фр. 0-5 мм, маркой по дробимости 1200.

Микрокремнезем марки МК-85 (г. Челябинск).

Зола-унос Ново-Иркутской ТЭЦ (г. Иркутск).

Золошлаковая смесь (ЗШС) Усть-Илимской ТЭЦ (г. Иркутск).

Метакаолин производства ООО «Пласт-Рифей» каолиновый карьер Журавлиный лог (г. Пласт).

Содержание основных оксидов активных минеральных наполнителей (микрокремнезема, золы-уноса, ЗШС, метакаолина) представлен в таблице 1.

Таблица 1

Содержание оксидов

Вид минерального сырья	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Микрокремнезем	97,13	0,52	0,04	0,45	0,36	0,67	0,25
Зола-уноса	56,37	15,6	7,14	13,27	2,92	0,75	0,19
ЗШС	42,57	5,50	7,71	16,98	3,26	0,36	0,23
Метакаолин	53,81	42,60	0,72	0,15	1,87	0,96	0,05

В качестве вяжущего использовали портландцемент (ПЦ) промышленного изготовления ПАО «Мордовцемент» ЦЕМ I 52,5Н ГОСТ 31108-2020. Химико-минералогический состав и физико-механические свойства портландцемента представлены в таблице 2.

Таблица 2

Свойства портландцемента

№ п/п	Наименование показателя	Ед. изм.	Регламентированные значения согласно ГОСТ 31108-2020	Значение показателя	
				по паспорту	факт
1	Удельная поверхность	см ² /г	не нормируется	нет	3700
2	Нормальная густота	%	не нормируется	27	28
3	Начало схватывания	мин	не ранее 45	160	140
4	Активность по прочности при сжатии: - через 28 суток норм. тв.	МПа	не менее 52,5	54,2	53,4
Химико-минералогический состав клинкера					
5	Содержание оксида магния MgO в клинкере	%	не более 5,0	1,3	-
6	C ₃ S	%	не нормируется	69,62	-
7	C ₂ S	%	не нормируется	7,76	-
8	C ₃ A	%	не нормируется	6,47	-
9	C ₄ AF	%	не нормируется	13,63	-

В работе использовали следующие ПАВ:

Анионоактивный суперпластификатор СП-1 (АО «ГК Полипласт»), представляющий собой порошок коричневого цвета с pH = 8 ± 1. Суперпластификатор РС-1701 (ООО «Новый Мир») на основе поликарбоксилатного сополимера. Порошок белого цвета с pH = 8,0 ± 1,0.

В работе приняты следующие способы совмещения ПАВ и минеральных наполнителей для приготовления цементно-водных суспензий (далее ЦВС):

1. Дискретное распределение – совместное перемешивание порошкообразного суперпластификатора, цемента и минерального наполнителя с последующим их затворением водой;

2. Из раствора с водой затворения – приготовление водного раствора суперпластификатора и его смешение с цементом и минеральным наполнителем;

3. Функционализация – совместное перемешивание цемента и функционализированного наполнителя, полученного путем совместного помола в вибрационно-шаровой мельнице с суперпластификатором.

В ходе эксперимента суперпластификатор наносился на поверхность наполнителей в лабораторной вибрационно-шаровой мельнице СВМ-3. Удельную поверхность порошков определяли с помощью прибора ПСХ-10А.

Исходя из опыта ряда исследователей [8,15,17], содержание минеральных наполнителей от массы цемента принимали 30 % для всех применяемых наполнителей, кроме микрокремнезема и метакеолина. Последние добавляли в количестве 10 % от массы портландцемента. Известняки, зола-уноса и ЗШС были размолоты до удельной поверхности 5200-5500 см²/г, метакеолин изначально обладал удельной поверхностью 16500 см²/г, микрокремнезем – 38500 см²/г.

Пластифицирующую способность ПАВ оценивали по распылу ЦВС из миницилиндра (h = 70 мм, ø32 мм) по методике [20].

3. Результаты и обсуждение

На первом этапе работы были определены предельные концентрации сухих суперпластификаторов СП-1 и РС-1701 в цементно-водных суспензиях, при которых достигается наибольшая подвижность цементного теста (рис. 1).



Рис. 1. Изменение подвижности цементной суспензии от концентрации ПАВ (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Change in mobility of cement suspension depending on surfactant concentration (illustration by the authors)

Водоцементное отношение принято опытным путем, исходя из реологической чувствительности цементной суспензии с малыми концентрациями ПАВ и ее нерасслаиваемости.

Наибольшая пластификация цементно-водной суспензии с химической добавкой поликарбоксилатного типа РС-1701 обеспечивается при ее концентрации 0,8 %, с добавкой СП-1 – 1,6 % от массы портландцемента. Дальнейшее увеличение содержания ПАВ не повышает подвижность цементно-водных суспензий.

На практике содержание СП-1 ограничивается 1 % от массы портландцемента, что обуславливается его негативным влиянием на скорость схватывания цементного теста и раннюю прочность бетона. С учетом современного опыта применения для функционализации наполнителей были приняты максимальные концентрации суперпластификаторов РС-1701 – 0,8 % и СП-1 – 1 % от массы портландцемента.

Влияние способа введения суперпластификаторов на подвижность ЦВС оценено для СП-1 при В/Т = 0,5, для РС-1701 при В/Т = 0,27. Результаты приведены на рис. 2 и рис. 3, соответственно.

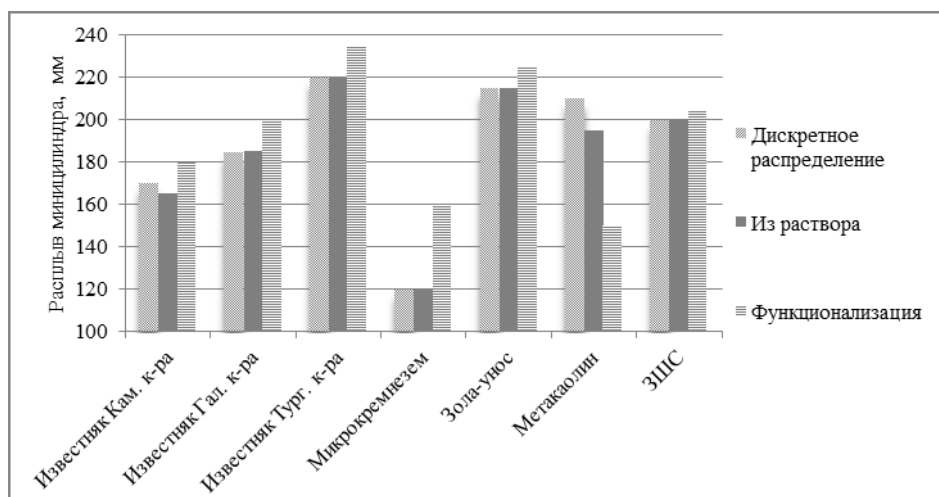


Рис. 2. Изменение подвижности ЦВС в зависимости от вида наполнителя и способа введения суперпластификатора СП-1 (иллюстрация авторов)
 Fig. 2. Change in the mobility of an aqueous cement-mineral suspension depending on the type of filler and the method of introducing superplasticizer SP-1 (illustration by the authors)

Как видно из рис. 2, функционализация наполнителей при прочих равных условиях привела к увеличению подвижности ЦВС. Исключением стала лишь ЦВС с метакаолином, у которой распыл миницилиндра снизился. В процессе помола с СП-1 частицы метакаолина налипали на мелющие тела и корпус мельницы и агрегировались, что не позволило обеспечить эффект функционализации.

При дискретном способе введения СП и наполнителя наибольшей подвижностью обладала ЦВС с известняком Тургоякского карьера (220 мм), наименьшей – с микрокремнеземом (120 мм). Несмотря на это, при функционализации микрокремнезема происходит существенный рост подвижности ЦВС (на 25 %) по сравнению с его дискретным способом введения. Функционализация известняка также привела к росту подвижности ЦВС, однако менее эффективно – на 6,4 %.

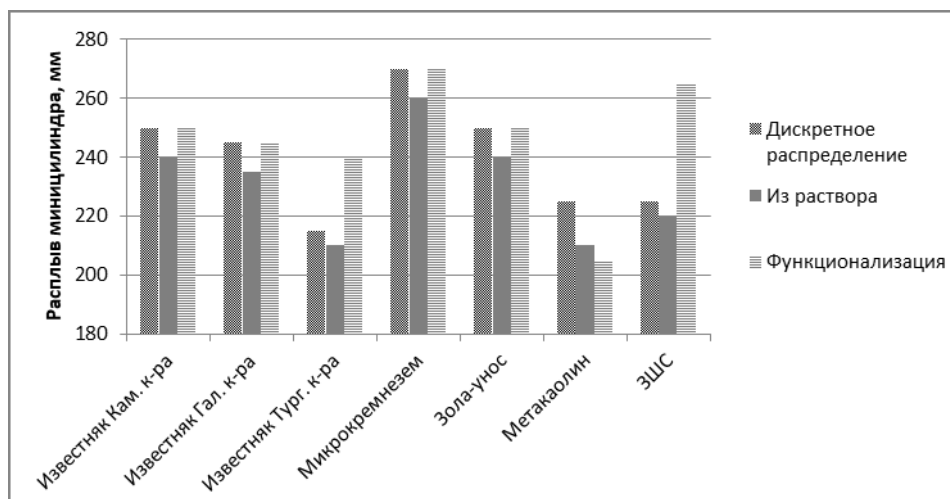
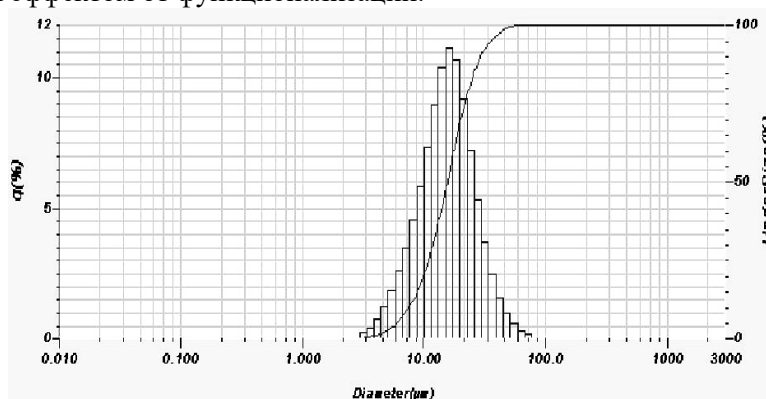


Рис. 3. Изменение подвижности ЦВС в зависимости от вида наполнителя и способа введения суперпластификатора РС-1701 (иллюстрация авторов)
 Fig. 3. Change in the mobility of an aqueous cement-mineral suspension depending on the type of filler and the method of introducing superplasticizer PC-1701 (illustration by the authors)

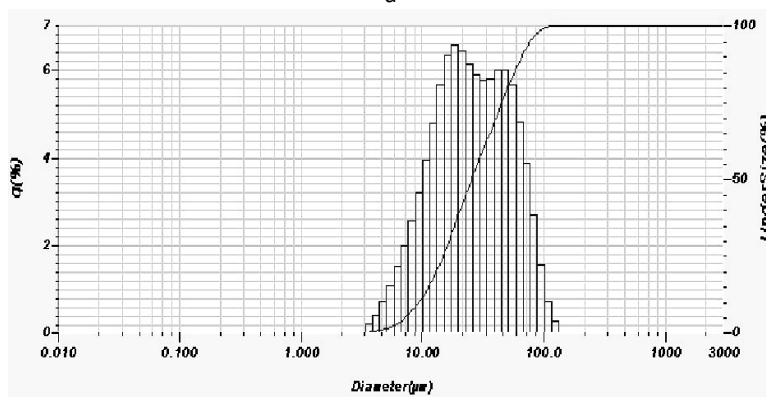
Из рис. 3 следует, что на подвижность ЦВС значительное влияние оказывает вид применяемого наполнителя. При введении поликарбоксилатного РС-1701 дискретным способом наибольшей подвижностью обладает ЦВС с микрокремнеземом (270 мм), а наименьшей – с известняком Тургоякского карьера (215 мм). Функционализация

минеральных наполнителей оказывается эффективной для ЦВС, приготовленной с использованием известняка Тургоякского карьера и ЗШС. Рост распыла миницилиндра относительно дискретного способа составил 10 и 15 %, соответственно.

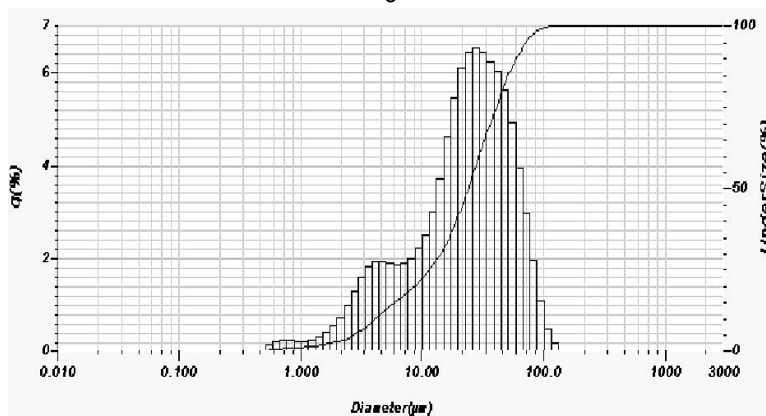
На рис. 4 приведено распределение частиц по размерам минеральных наполнителей с наибольшим эффектом от функционализации.



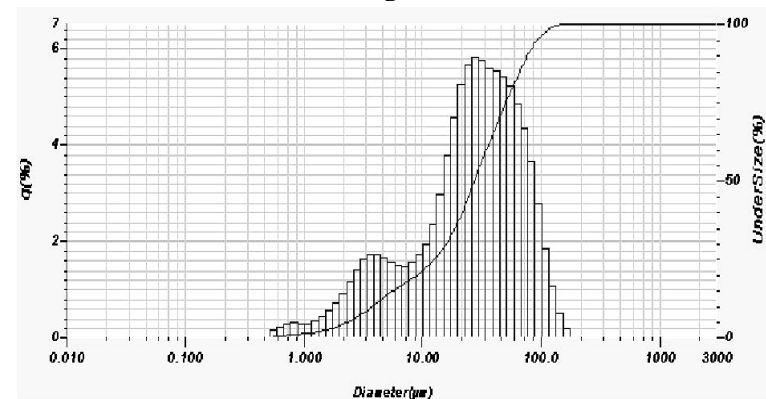
а



б



в



г

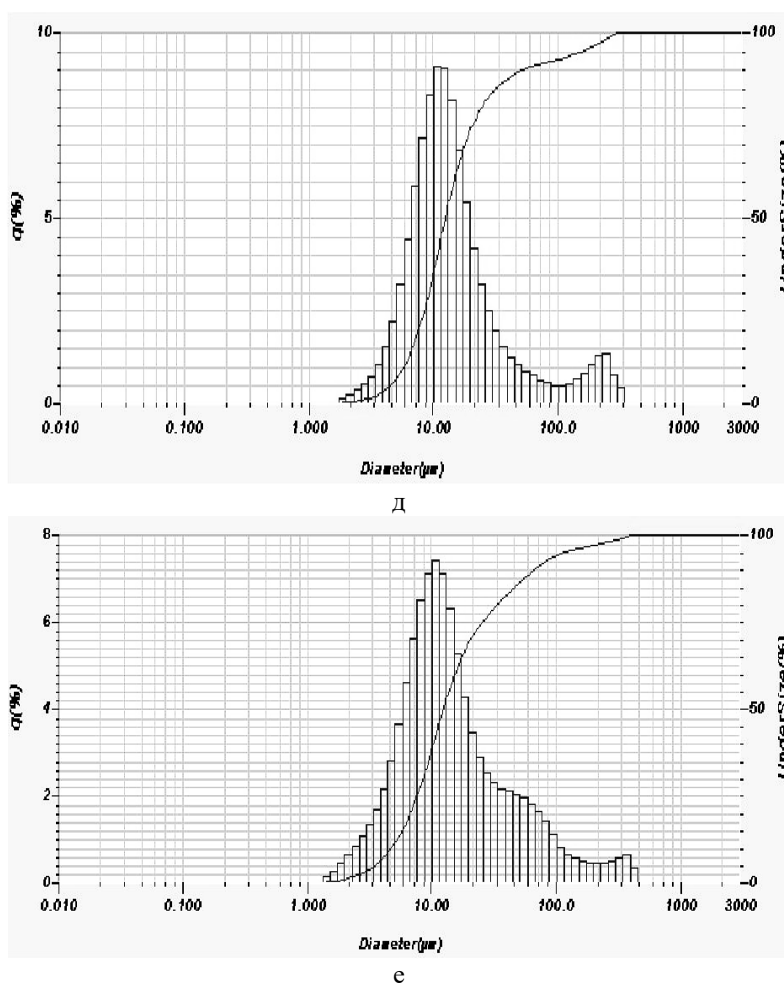


Рис. 4. Распределение частиц по размерам:

а – микрокремнезема, б – функционализированного СП-1 микрокремнезема, в – ЗШС, г – функционализированного РС-1701 ЗШС, д – известняка Тургойского карьера, е – функционализированного РС-1701 известняка (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Particle size distribution:

a – microsilica, b – functionalized SP-1 microsilica, c – ash and slag mixture, d – functionalized PC-1701 ash and slag mixture, e – limestone from the Turgoyak quarry, f – functionalized PC-1701 limestone (illustration by the authors)

Медианный (срединный) размер частиц микрокремнезема (рис. 4а) составляет 15,7 мкм, после функционализации (рис. 4б) – 25,4 мкм. Медианный размер частиц ЗШС (рис. 4в) – 24,0 мкм, а после функционализации (рис. 4г) – 27,5 мкм. Для известняка значения данного параметра составляет (рис. 4д) 12,6 мкм, после функционализации – 12,5 мкм.

Увеличение срединного размера частиц может быть связано с агрегацией частиц минеральных наполнителей в процессе помола, либо с присутствием свободных частиц ПАВ, которые не адсорбировались на поверхность минеральных наполнителей. Также на это указывает увеличение количества частиц с размерами 10-50 мкм после функционализации минеральных наполнителей.

Эффективность функционализации минеральных наполнителей оценивали по водопотребности тяжелых бетонных смесей с подвижностью П5 (20-22 см) и прочности на сжатие контрольных образцов-кубов с размерами 100×100×100 мм на 28 суток. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Свойства тяжелых бетонных смесей и бетона с функционализированными наполнителями

№	Состав бетонной смеси						В/Ц	Плотность бетонной смеси	Прочность на сжатие
	ЦЕМ I 52,5Н	Щебень фр. 5-20	Песок М _к 2,4	МН		СП*			
	кг/м ³	кг/м ³	кг/м ³	вид	кг/м ³	кг/м ³			
1	400	1100	800	микрокремнезем	40	4	0,6	2346	35,6
2				функц. микрокр.		-	0,48	2374	44,3
3			680	ЗШС	120	3,2	0,44	2328	45
4				функц. ЗШС		-	0,4	2344	53,2
5				изв. Тург. к-ра		3,2	0,45	2320	43,5
6				функц. изв. Тург. к-ра		-	0,4	2348	47,8

* – Суперпластификатор в составах с функционализированными наполнителями содержится в минеральной добавке в том же количестве, что и в контрольных составах

Как видно из таблицы 3, водопотребность бетонных смесей с функционализированными наполнителями снижается на 20, 9 и 11 %, соответственно, для смесей №2, №4 и №6. Закономерно возрастает плотность смесей и прочность бетона. Для бетона с микрокремнеземом после функционализации она возросла на 20 %, с ЗШС – на 15 %, с известняком – на 9 %.

4. Заключение

Таким образом, на основании проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Определены оптимальные концентрации суперпластификаторов СП-1 и РС-1701, при которых достигается наибольшая пластификация цементно-водной суспензии: СП-1 – 1 % от массы портландцемента; РС-1701 – 0,8 % от массы портландцемента.
2. Установлена зависимость подвижности ЦВС от способа введения в них суперпластификаторов. Показано, что функционализация минеральных наполнителей суперпластификатором повышает подвижность ЦВС. Наибольший прирост подвижности (25 %) при функционализации с суперпластификатором СП-1 обладает ЦВС с микрокремнеземом. При функционализации минеральных наполнителей суперпластификатором РС-1701 прирост подвижности ЦВС с известняком Тургоякского карьера составил 10 %, с золошлаковой смесью – 15 %.
3. Оценено распределение частиц по размерам минеральных наполнителей с наибольшим эффектом от функционализации. Показано, что после функционализации медианный размер частиц возрастает у всех минеральных наполнителей и увеличивается количество частиц с размерами 10-50 мкм.
4. Показано, что водопотребность бетонных смесей с функционализированными минеральными наполнителями снижается на 20 % для микрокремнезема, на 9 % для золошлаковой смеси и на 11 % для известняка Тургоякского карьера по сравнению с другими способами введения СП. Закономерно возрастает прочность на сжатие бетона, соответственно на 20, 15 и 9 %.

Список литературы/References

1. Хохряков О.В., Хозин В.Г., Харченко И.Я. и др. Цементы низкой водопотребности – путь эффективного использования клинкера и минеральных наполнителей в бетонах // Вестник МГСУ. 2017. Т. 109, № 10 Т. 12. С. 1145–1152. [Khokhryakov O.V., Khozin V.G., Kharchenko I.Ya. and others. Low water demand cements – a way to effectively use clinker and mineral fillers in concrete // Bulletin of MGSU. 2017. Vol. 109, No. 10 Vol. 12. P. 1145–1152.]
2. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Сибгатуллин И.Р. «Карбонатные» цементы низкой водопотребности. Издательство АСВ, 2021. 366 с. [Khozin V.G., Khokhryakov O.V.,

- Sibgatullin I.R. "Carbonate" cements with low water demand. Publishing house DIA, 2021. 366 p.]
3. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Низамов Р.К. Карбонатные цементы низкой водопотребности – перспективные вяжущие для бетонов // Бетон и железобетон. 2020. Т. 601, № 1. С. 15–28. – EDN VIDDBF. [Khozin V.G., Khokhryakov O.V., Nizamov R.K. Carbonate cements with low water demand are promising binders for concrete // Concrete and reinforced concrete. 2020. Vol. 601, No. 1. P. 15–28. – EDN VIDDBF.]
 4. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Низамов Р.К. и др. Опыт наномодификации цементов низкой водопотребности // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 1. С. 53–57. [Khozin V.G., Khokhryakov O.V., Nizamov R.K. and others. Experience of nanomodification of cements with low water demand // Industrial and civil construction. 2018. No. 1. P. 53–57.]
 5. Морозова Н.Н., Кайс Х.А. Повышение реакционной способности цеолитсодержащих цементов механической активацией // Вестник Технологического университета. 2016. Т. Т. 19, № 14. С. 79–82. [Morozova N.N., Kays H.A. Increasing the reactivity of zeolite-containing cements by mechanical activation // Bulletin of the Technological University. 2016. T. T. 19, no. 14. pp. 79–82.]
 6. Каприелов С.С., Батраков В.Г., Шейнфельд А.В. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива // Бетон и железобетон. 1999. № 6. С. 6-10. – EDN ХМСВФJ. [Kaprielov S.S., Batrakov V.G., Sheinfeld A.V. New generation modified concretes: reality and prospects // Concrete and reinforced concrete. 1999. No. 6. P. 6-10. – EDN ХМСВФJ.]
 7. Калашников В.И., Тараканов О.В., Кузнецов Ю.С. и др. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей // Инженерно-строительный журнал. 2012. Т. 34, № 8. С. 47–53. – EDN PJWLHF. [Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Kuznetsov Yu.S. and others. New generation concretes based on dry fine-grained powder mixtures // Engineering and Construction Journal. 2012. Vol. 34, No. 8. P. 47–53. – EDN PJWLHF.]
 8. Калашников В.И., Москвин Р.Н., Белякова Е.А. Высокодисперсные наполнители для порошково-активированных бетонов нового поколения // Системы. Методы. Технологии. 2014. Т. 22, № 2. С. 113–118. – EDN SFPCLD. [Kalashnikov V.I., Moskvina R.N., Belyakova E.A. Highly dispersed fillers for new generation powder-activated concrete // Systems. Methods. Technologies. 2014. Vol. 22, No. 2. P. 113–118. – EDN SFPCLD.]
 9. Mayhoub O.A., Nasr E.S.A.R., Ali Y.A. The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: A review // Ain Shams Eng. J. Faculty of Engineering, Ain Shams University, 2021. Vol. 12, № 1. P. 145–158.
 10. Ahmad J., Martínez-García R., De-Prado-gil J. Concrete with Partial Substitution of Waste Glass and Recycled Concrete Aggregate // Materials (Basel). 2022. Vol. 15, № 2.
 11. Ge W., Wang A., Zhang Z. Study on the workability, mechanical property and water absorption of reactive powder concrete // Case Stud. Constr. Mater. Elsevier Ltd, 2023. T. 18, № October 2022. С. e01777.
 12. Alharbi Y.R., Abadel A.A., Mayhoub O.A. Effect of using available metakaoline and nano materials on the behavior of reactive powder concrete // Constr. Build. Mater. Elsevier Ltd, 2021. T. 269, № xxxx. С. 121344.
 13. Alharbi Y.R., Abadel A.A., Salah A.A. Engineering properties of alkali activated materials reactive powder concrete // Constr. Build. Mater. Elsevier Ltd, 2021. T. 271, № xxxx. С. 121550.
 14. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Батраков В.Г. Комплексный модификатор бетона марки МБ-01 // Бетон и железобетон. 1997. № 5. С. 38–41. – EDN WLLWRB. [Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Batrakov V.G. Complex concrete modifier brand MB-01 // Concrete and reinforced concrete. 1997. No. 5. P. 38–41. – EDN WLLWRB.]
 15. Перцев В.Т., Леденев А.А., Халилбеков Я.З. Комплексные органоминеральные добавки для бетонов // Символ науки: международный научный журнал. 2017. № 4 Т. 2. С. 89–91 – EDN YNEJNL. [Pertsev V.T., Ledenev A.A., Khalilbekov Ya.Z.

- Complex organomineral additives for concrete // Symbol of Science: international scientific journal. 2017. No. 4 Vol. 2. P. 89–91 – EDN YNEJNL.]
16. Тараканов О.В., Акчурин Т.К., Белякова Е.А. и др. Перспективы применения комплексных органоминеральных добавок в бетонах нового поколения // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия Строительство и архитектура. 2023. Т. 91, № 2. С. 88–98. – EDN VXWGFN. [Tarakanov O.V., Akchurin T.K., Belyakova E.A. and others. Prospects for the use of complex organomineral additives in new generation concretes // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series Construction and architecture. 2023. Vol. 91, No. 2. P. 88–98. – EDN VXWGFN.]
 17. Перцев В.Т., Леденев А.А., Ноаров В.Б. и др. Свойства цементных систем, модифицированных химическими и минеральными добавками // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2017. Т. 14, № 1. С. 49–52 – EDN ZEZUQT. [Pertsev V.T., Ledenev A.A., Noarov V.B. and others. Properties of cement systems modified with chemical and mineral additives // Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Physico-chemical problems and high technologies of building materials science. 2017. Vol. 14, no. 1. P. 49–52 – EDN ZEZUQT.]
 18. Перцев В.Т., Леденев А.А., Рудаков О.Б. Физико-химические подходы к разработке эффективных органоминеральных добавок для бетона // Конденсированные среды и межфазные границы. 2018. Т. 3, № 20. С. 432–442. [Pertsev V.T., Ledenev A.A., Rudakov O.B. Physico-chemical approaches to the development of effective organomineral additives for concrete // Condensed media and interphase boundaries. 2018. Vol. 3, No. 20. P. 432–442.]
 19. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М.: Стройиздат, 1981. 464 с. [Akhverdov I.N. Fundamentals of concrete physics. M.: Stroyizdat, 1981. 464 p.]
 20. Калашников В.И., Мороз М.Н., Тараканов О.В. и др. Новые представления о механизме действия суперпластификаторов, совместно размолотых с цементом или минеральными породами // научно-технический и производственный журнал «Строительные материалы». 2014. № 9. С. 70–75. [Kalashnikov V.I., Moroz M.N., Tarakanov O.V. and others. New ideas about the mechanism of action of superplasticizers, jointly ground with cement or mineral rocks // scientific, technical and production journal “Building Materials”. 2014. No. 9. P. 70–75.]

Информация об авторах

Беляков Андрей Юрьевич, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: belyakoffandrey@mail.ru

Хохряков Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: olvik@list.ru

Хозин Вадим Григорьевич, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: khozin.vadim@yandex.ru

Information about the authors

Andrey Yu. Belyakov, post-graduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: belyakoffandrey@mail.ru

Oleg V. Khokhryakov, doctor of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: olvik@list.ru

Vadim G. Khozin, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.
Email: khozin.vadim@yandex.ru