

Научная статья

УДК 691

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-150-157>

EDN: HSOGUG



ОПТИМИЗАЦИЯ ДИСПЕРСНОСТИ КВАРЦЕВОГО МИКРОНАПОЛНИТЕЛЯ

Н. М. Толыпина, Е. Н. Хахалева*, Д. А. Толыпин

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

г. Белгород, Россия

tolypina.n@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5788-8520>hahaleva7@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4868-2181>tolypina.n@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9920-7180>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из проблем разработки бетонов нового поколения является обеспечение рационального гранулометрического состава смеси цемента и тонкодисперсных добавок для обеспечения плотнейшей упаковки всех частиц цементной системы. В этой связи в работе рассмотрены вопросы оптимизации дисперсной структуры кварцевого наполнителя с учетом его удельной поверхности, концентрации в составе вяжущего и водотвердого отношения.

Материалы и методы. В исследованиях применяли портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н (ГОСТ 31108–2020) ЗАО «Белгородский цемент» и тонкодисперсный кварц. Образцы на прочность при сжатии испытывали на лабораторном прессе ПГМ-100 МГ4. Гранулометрический состав наполнителей определяли с помощью лазерного дифракционного анализатора размера частиц Analysette 22 NanoTec plus.

Результаты. Проведенные исследования позволили определить, что оптимальные дозировки микродисперсного наполнителя тесно связаны с удельной поверхностью и В/Т смеси. Показано, что с ростом дисперсности кварцевого наполнителя наблюдается уменьшение диапазона оптимальных дозировок, который сужается с увеличением водотвердого отношения. Описаны механизмы структурообразования, влияющие на свойства дисперсно-оптимизированных цементных систем. С ростом удельной поверхности наполнителя снижается удельная активность единицы поверхности наполненного вяжущего, что сопровождается снижением количества кристаллизационно-коагуляционных связей между гидратными фазами цемента.

Закключение. Полученные экспериментальные данные подтверждают, что для цементного камня из смешанного вяжущего водотвердое отношение является не менее существенным показателем, чем величина концентрации минеральной добавки, поэтому снижение В/Т смешанных цементов является необходимым условием для достижения заданной прочности бетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: минеральный наполнитель, дисперсность, гранулометрия кварцевого наполнителя, водотвердое отношение, прочность цементного камня

Статья поступила в редакцию 15.12.2022; одобрена после рецензирования 20.01.2023; принята к публикации 20.02.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Толыпина Н. М., Хахалева Е. Н., Толыпин Д. А. Оптимизация дисперсности кварцевого микронаполнителя // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 1 (89). С. 150-157. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-150-157>

© Толыпина Н. М., Хахалева Е. Н., Толыпин Д. А., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-150-157>

EDN: HSOGUG

QUARTZ MICROFILL DISPERSION OPTIMISATION

Natalia M. Tolypina, Elene N. KHakhaleva*, Daniil A. Tolypin

Shukhov Belgorod State Technological University

Belgorod, Russia

tolypina.n@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5788-8520>

hakhaleva7@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4868-2181>

tolypina.n@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9920-7180>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. One of the problems of developing new generation concrete is to ensure the rational granulometric composition of a mixture of cement and fine additives to ensure the densest packing of all particles of the cement system. In this regard, the paper considers the optimization of the dispersed structure of quartz filler, taking into account its specific surface area, concentration in the composition of the binder and water-solid ratio.

Materials and methods. In the studies, Portland cement TSEM I 42.5 N (GOST 31108-2020) of ZAO Belgorod Cement and fine quartz were used. The compressive strength samples were tested on a PGM-100 MG4 laboratory press. The granulometric composition of the fillers was determined using Analysette 22 NanoTec plus laser diffraction particle size analyzer.

Results. The conducted studies have allowed to determine that the optimal dosages of microdispersion filler are closely related to the specific surface area and the V/T of the mixture. It is shown that with an increase in the dispersion of quartz filler, a decrease in the range of optimal dosages is observed, which narrows with an increase in the water-solid ratio. The mechanisms of structure formation affecting the properties of dispersed-optimized cement systems are described. With the growth of the specific surface of the filler, the specific activity of the unit of the surface of the filled binder decreases, which is accompanied by a decrease in the number of crystallization-coagulation bonds between the hydrate phases of cement.

Conclusion. The experimental data obtained confirm that for a cement stone made of a mixed binder, the water-solid ratio is no less significant than the concentration of a mineral additive, therefore, a decrease in the V/T of mixed cements is a necessary condition for achieving a given strength.

KEYWORDS: mineral filler, dispersion, granulometry of quartz filler, water-solid ratio, strength of cement stone

The article was submitted 15.11.2022; approved after reviewing 20.01.2023; accepted for publication 20.02.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Tolypina N. M., KHakhaleva E. N., Tolypin D. A. Quartz microfill dispersion optimisation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (1): 150-157. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-150-157>

© Tolypina N. M., KHakhaleva E. N., Tolypin D. A., 2023



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Специалистами по строительным материалам гидратационного твердения последние годы уделяется определенное внимание проблеме разработки так называемых бетонов нового поколения. Это порошково-активированные многокомпонентные бетоны с низким удельным расходом цемента на единицу прочности с измененной топологической структурой, при оптимизированном содержании реологических и реакционно-активных наполнителей и эффективных супер- и гиперпластификаторов [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Такие бетоны обладают высокими деформативно-прочностными характеристиками и долговечностью. Эти материалы могут успешно применяться в высотном строительстве, восстановительных работах, при возведении несущих и архитектурно-декоративных конструкций, при строительстве мостов и других транспортных сооружений.

К одному из принципов решения проблемы разработки порошковых бетонов можно отнести обеспечение рационального гранулометрического состава смеси цемента и тонкодисперсных добавок, которая должна обеспечивать плотнейшую упаковку всех частиц цементной системы [10, 11]. Для решения этой задачи возможны варианты: когда в пустотах вяжущего располагаются частицы наполнителя, и, наоборот, когда в пустотах наполнителя располагаются частицы вяжущего. Во всех случаях тонкость помола и вяжущего, и наполнителя должна характеризоваться различной удельной поверхностью [12, 13, 14].

При этом к наиболее важным параметрам тонкодисперсных наполнителей, определяющим их эффективность использования, относятся показатели удельной поверхности и их дозировку [15, 16]. Применение в оптимальных дозировках тонкодисперсных наполнителей не снижает, а в некоторых случаях повышает прочность наполненного цементного вяжущего, способствует экономии клинкера, оказывает демпфирующее действие, выполняет функцию центров кристаллизации и т.п. [17, 18, 19]. Однако ряд решений по проблеме обеспечения плотной упаковки цементных систем требуют дополнительного рассмотрения. Данная работа посвящена этому вопросу.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для исследований использовали вяжущее ЦЕМ I 42,5 Н ($S_{уд} = 320 \text{ м}^2/\text{кг}$), тонкодисперс-

ный кварцевый наполнитель ($S_{уд} = 200, 500, 700, 900 \text{ м}^2/\text{кг}$) в дозировках 5, 10, 15 и 20%. Изготавливали одну серию образцов $3 \times 3 \times 3 \text{ см}$ с $B/T = 0,27$, соответствующей водопотребности цементного теста, вторую серию образцов аналогичного размера изготавливали при более высоком значении $B/T=0,3$. Через 28 сут нормального твердения образцы испытывали на лабораторном прессе ПГМ-100 МГ4 на прочность при сжатии. Гранулометрию порошкообразного кварца определяли при помощи лазерного дифракционного анализатора размера частиц Analysette 22 NanoTec plus.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве субъекта исследований использовали вяжущее с тонкодисперсным кварцевым наполнителем, широко применяемое в качестве минерального компонента в порошковых бетонах. Результаты исследований показали, что при оптимальных дозировках тонкодисперсного кварца прочность цементного камня незначительно повышается, при дальнейшем увеличении концентрации наполнителя наблюдается спад прочности. Дисперсный наполнитель при минимальной удельной поверхности $200 \text{ м}^2/\text{кг}$ проявляет наибольшую эффективность, обеспечивает повышение прочности и затем ее плавное снижение с ростом дозировки. Характер снижения прочности при сжатии цементного камня с ростом концентрации наполнителя и его удельной поверхности достаточно схож для всех составов. Повышение концентрации наполнителя до 20% и рост удельной поверхности от 500 до $900 \text{ м}^2/\text{кг}$ привело к спаду прочности при сжатии цементного камня на 8,5% ($B/T = 0,27$), а при увеличении B/T до 0,3 – снижению прочности приблизительно на 15% (рисунок 1).

С увеличением водотвердого отношения прочность цементного камня снижается более резко с ростом дозировки наполнителя и его дисперсности, чем при меньших значениях B/T (рисунок 1, б). Полученные данные показывают, что для цементного камня из смешанного вяжущего соотношение B/T является не менее важным параметром, чем степень замещения портландцемента добавкой. С увеличением водотвердого отношения целесообразно снижать дозировку вводимого наполнителя. Очевидно, что снижение B/T для бетонов, приготовленных на основе смешанных цемента, является необходимой мерой, обеспечивающей получение заданной прочности.

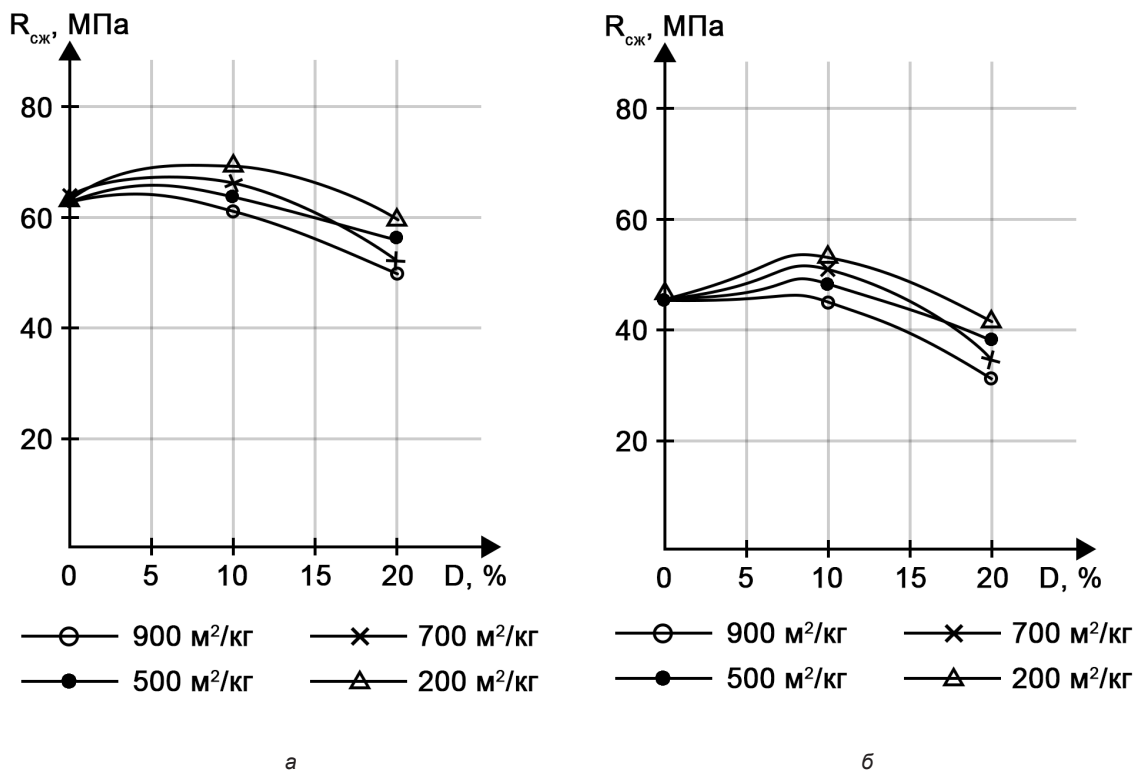


Рисунок 1 – Влияние V/T и удельной поверхности тонкодисперсного кварца на прочность при сжатии цементного камня: а – $V/T = 0.27$; б – $V/T = 0.3$
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The effect of V/T and the specific surface of fine quartz on the compressive strength of cement stone: а) $V/T = 0.27$; б) $V/T = 0.3$.
Source: compiled by the authors.

Для смешанных вяжущих нормальной плотности интервал оптимальных дозировок приблизительно 12–15%, с повышением водотвердого отношения до 0,3 диапазон оптимальных дозировок сужается до 7–9%. Чем выше дисперсность кварцевого наполнителя, тем меньше дозировка и более узкий диапазон.

В настоящее время используются различные модели упаковки частиц заполнителей в бетоне. Наиболее востребованными являются уравнения, разработанные Фуллером, Функом и Дингером [20]. Принципиальная разница между ними заключается в том, что модель Фуллера охватывает весь диапазон дисперсных частиц: от максимального размера крупного заполнителя до самых малых частиц смеси менее 10 мкм, например, вяжущего. У модели Функа и Дингера минимальный размер частиц ограничивается 100 мкм, т.е. мелким заполнителем. В этой связи модель Фулле-

ра предпочтительна для оптимизации смеси вяжущего с наполнителем. Учитывая, что количество частиц портландцемента размером более 65 мкм незначительно, добавление грубомолотого кварца с удельной поверхностью 100–200 м²/кг позволяет восполнить недостающий диапазон частиц от 65 до 160 мкм (между вяжущим и мелким заполнителем), чтобы максимально приблизиться к гранулометрической кривой Фуллера. Это позволит повысить плотность упаковки растворной части бетона и тем самым улучшить физико-механические показатели.

Изменения удельной поверхности тонкодисперсного наполнителя специфично связаны с гранулометрией частиц. Взаимосвязь между гранулометрией наполнителя и вяжущего вызывает необходимость оптимизировать общую гранулометрию зернистых составляющих смеси для повышения плотности упаковки частиц.

По данным [21], средняя величина удельной поверхности российских цементов $S_{уд} = 327 \text{ м}^2/\text{кг}$, при этом среднее содержание частиц менее 5 мкм составляет 13,1%, 5–30 мкм – 46%, свыше 30 мкм – 40,9%, на долю частиц размером свыше 60 мкм приходится незначительное количество. Так как частицы портландцемента размером более 60 мкм не гидратируются полностью, ввод крупных частиц 50–100 мкм инертного кварцевого порошка позволит заменить портландцемент без существенного снижения прочности.

Данные лазерной гранулометрии вяжущего и кварцевого наполнителя с $S_{уд} = 100, 200$ и $600 \text{ м}^2/\text{кг}$ приведены на рисунке 2 и в таблице.

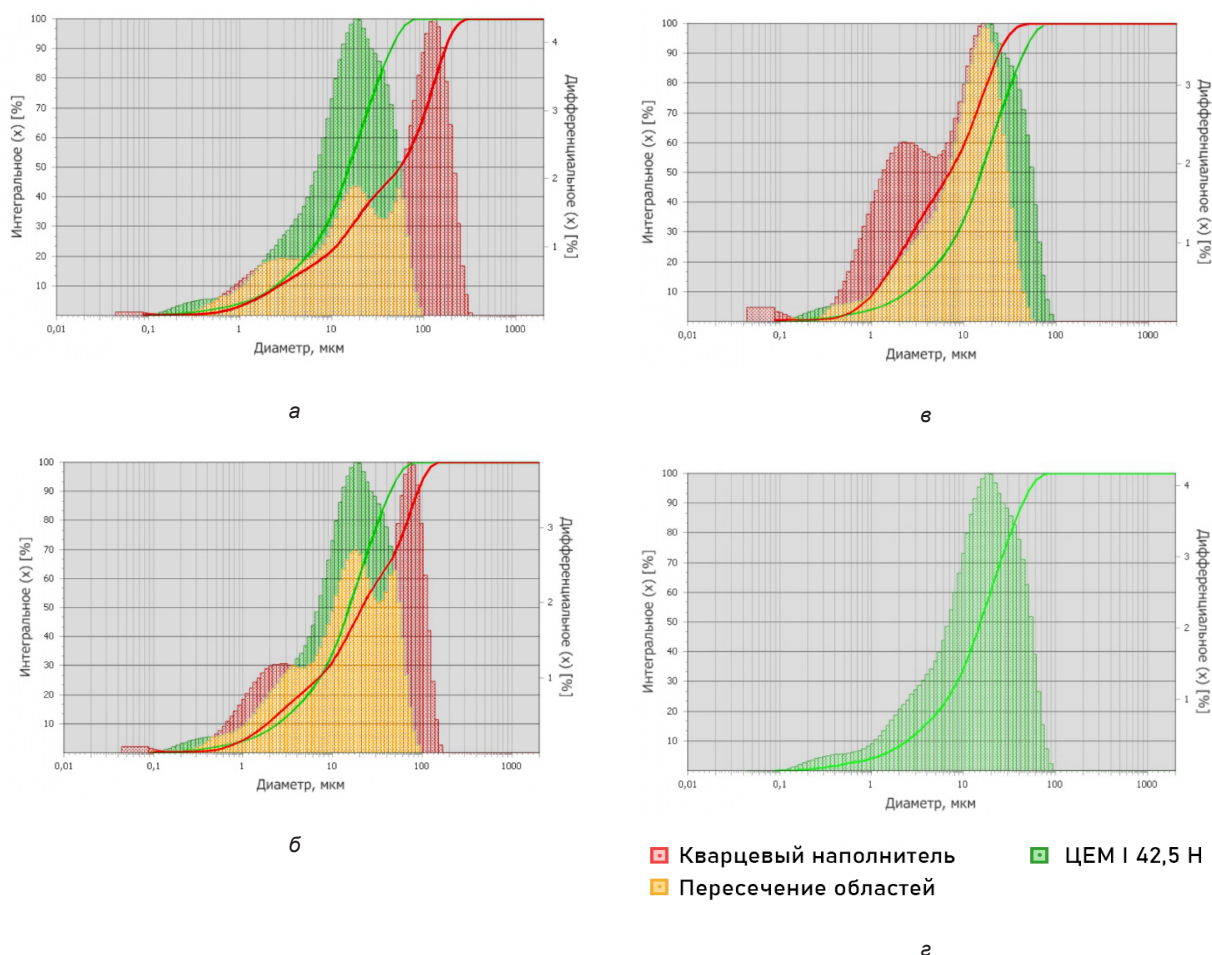


Рисунок 2 – Гранулометрия вяжущего (ЦЕМ I) и дисперсного кварца с $S_{уд}$: а – $100 \text{ м}^2/\text{кг}$; б – $200 \text{ м}^2/\text{кг}$; в – $600 \text{ м}^2/\text{кг}$; г – ЦЕМ I, $S_{уд} = 320 \text{ м}^2/\text{кг}$
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Granulometry of CEM I and dispersed quartz with $S_{уд}$: а) $100 \text{ м}^2/\text{кг}$; б) $200 \text{ м}^2/\text{кг}$; в) $600 \text{ м}^2/\text{кг}$; г) CEM I, $S_{уд} = 320 \text{ м}^2/\text{кг}$
Source: compiled by the authors.

Таблица
Гранулометрический состав вяжущего и дисперсного кварца
Источник: составлено авторами.

Table
Granulometric composition of binder and dispersed quartz
Source: compiled by the authors.

$S_{уд}, м^2/кг$	Кол-во частиц, %, по фракциям (мкм)				
	<1	1–5	5–30	30–65	>65
тонкодисперсный кварц					
100	3,34	12,05	26,06	12,43	46,06
200	4,5	11,28	37,26	19,26	21,7
600	9,39	33,55	53,57	3,49	0
портландцемент					
320	5	12,0	43	25	15

Как видно из приведенных данных, у дисперсного кварца с $S_{уд} = 100 м^2/кг$ количество крупных частиц более 65 мкм составило почти половину (около 46%), а остальная часть приходится на частицы менее 65 мкм, сопоставимые с размером частиц портландцемента. Дальнейший помол до $S_{уд} = 200 м^2/кг$ снижает количество частиц крупных фракций более 65 мкм до 22,7%, возрастает количество частиц фракции 5–30 мкм (37, 26%). Резко меняется гранулометрический состав частиц при измельчении до $S_{уд} = 600 м^2/кг$: частицы крупных фракций более 65 мкм отсутствуют, фракций 5–30 мкм достигают максимального значения 53,57%, значительно возрастает количество мелких частиц размером 1–5 мкм. Эти данные позволяют объяснить малоэффективность кварцевого наполнителя высокой дисперсности ($S_{уд}$ свыше 500 $м^2/кг$). Несмотря на повышение активности микронаполнителя по мере увеличения степени измельчения, гранулометрический состав порошкового кварца, представленный частицами (около 87%), сопоставимыми с зернами цемента (1–30 мкм), не обеспечивает плотное заполнение пустот между частицами вяжущего. При высокой дисперсности происходит усиление агрегирования микрочастиц наполнителя, приводящее к росту количества «сухих» контактов между ними и неравномерному распределению в цементной системе. С ростом удельной поверхности наполнителя снижается удельная активность единицы поверхности наполненного вяжущего, что сопровождается снижением ко-

личества кристаллизационно-коагуляционных связей между гидратными фазами цемента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, оптимальные дозировки микродисперсного наполнителя тесно связаны с удельной поверхностью и В/Т смеси. Целесообразно измельчение кварцевого наполнителя до удельной поверхности 200 $м^2/кг$ для использования в максимальной дозировке. При достаточно широком диапазоне степени измельчения кварцевого наполнителя (200–900 $м^2/кг$) необходимо снижать дозировку, при этом прочность изменяется мало.

Использование кварца с невысокой удельной поверхностью (200 $м^2/кг$) позволит улучшить гранулометрию смеси вяжущего с тонкодисперсным кварцевым наполнителем в соответствии с моделью Фуллера, получить более экономичное вяжущее за счет снижения энергозатрат на помол кварцевого наполнителя и его использования взамен клинкерной части.

Для цементного камня из смешанного вяжущего водотвердое отношение является важным фактором, поэтому для бетонов, приготовленных на основе смешанных цементов, снижение В/Т является необходимым условием для достижения заданной прочности.

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет – 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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.

2. Sanjuan M., Andrade C. Reactive Powder Concrete: Durability and Applications // *Applied Sciences*. 2021, 11(12), 5629. <https://doi.org/10.3390/app11125629>

3. Azmee N. M., Shafiq N., Case Stud. Constr. Mater., Ultra-High Performance Concrete: From Fundamental to Applications // *Case Studies in Construction Materials*. 2018, 9. doi:10.1016/j.cscm.2018.e00197

4. Ng K.M., Tam C.M., Tam V.W. Studying the production process and mechanical properties of reactive powder concrete: A Hong Kong study, *Magazine of Concrete Research*. 2010, Vol.62, No. 9, pp. 647-654. doi:10.1680/mac.9.00063

5. Shaheen E., Shrive N. Optimization of Mechanical Properties and Durability of Reactive Powder Concrete, 2006. *ACI Materials Journal*, 103(6), pp.444-451. doi:10.14359/18222

6. Sadrekarimi A. Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology* 2004. Vol. 2, No. 3, 409-417. doi:10.3151/jact.2.409

7. Aravindhan J., Vijayakumar G. Studies on strength characteristics of reactive powder concrete. *International Journal of Chemical Sciences*. 2016. 14(S1). 149-154.

8. Толстой А. Д., Лесовик В. С., Загороднюк Л. Х., Ковалева И. А. Порошковые бетоны с применением техногенного сырья // Вестник МГСУ. 2015. № 11. С. 101–109.

9. Long G., Wang X., Xie Y. Very-high-performance concrete with ultrafine powders. *Cement and Concrete Research*. 2002. 32(4). 601-605. doi:10.1016/S0008-8846(01)00732-3

10. Velichko E., Shokodko E. Reactive powder concrete based on multicomponent cement systems with multilevel optimization of the disperse composition. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 251, 01042. doi:10.1051/mateconf/201825101042

11. Hamiruddin N. A., Razak R. A., Muhamad K. The Effect of Different Sand Gradation with Ultra High Performance Concrete (UHPC). 2018. *Diffusion and Defect Data Pt.B: Solid State Phenomena*. 280, 476-480. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.280.476

12. Tikkanen J., Penttala V., Cwirzen A. Mineral powder concrete – Effects of powder content on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*. 2011. 63(12). 893-903 doi:10.1680/mac.10.00048

13. Bentz D.P., Conway J.T. Computer modelling of the replacement of «coarse» cement particles by inert fillers in low w/c ratio concretes: Hydration and strength. *Cement and Concrete Research*. 2001. 31(3). 503–506. doi:10.1016/S0008-8846(01)00456-2

14. Белов В. В., Образцов И. В., Куляев П. В. Методология проектирования оптимальных структур цементных бетонов // Строительные материалы. 2013. № 3. С. 17–21.

15. Энтин З. Б., Нефедова Д. С. О дисперсности и гранулометрии российских и зарубежных цементов // Цемент и его применение. № 3. 2008. С. 86–88.

16. Айчин П. К., Уилсон У., Миндесс С. Увеличение прочности бетонов, изготовленных из смешанных цементов // Цемент и его применение. № 5. 2018. С. 67–70.

17. Калашников В. И., Москвин Р. Н., Белякова Е. А., Белякова В. С., Петухов А. В. Высокодисперсные наполнители для порошково-активированных бетонов нового поколения // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 113–118.

18. Moosberg-Bustnes H. The function of fillers in concrete. *Materials and Structures*. 2004. 37(2). 74-81. doi:10.1617/13694

19. Дыкин И. В., Величко Е. Г., Ерёмин А. В. Порошково-активированные бетоны – многоуровнево-модифицированные цементные системы // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 3-4 (57). С. 37–40.

20. Белов В. В., Смирнов М. А. Строительные композиты из оптимизированных минеральных смесей: монография. Тверь: ТвГТУ, 2012. 112 с.

21. Ананьев С. В., Калашников В. И., Суздальцев О. В., Дрянин Р. А. Влияние тонкости помола и качества кварцевого песка на прочностные свойства порошкового бетона // Наука и мир. 2014. №8 (12). С. 34–36.

REFERENCES

1. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Kuznetsov Yu.S., Volodin V.M., Belyakova E.A. Be-tony novogo pokoleniya na osnove sukhikh tonkozernisto-poroshkovykh smesei [New generation concretes based on dry fine-grain-powder mixtures]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2012; 8 (34): 47-53. (in Russ.)

2. Sanjuan M., Andrade C. Reactive Powder Concrete: Durability and Applications. *Applied Sciences*. 2021; 11(12): 5629. <https://doi.org/10.3390/app11125629>

3. Azmee N. M., Shafiq N., Case Stud. Constr. Mater., Ultra-High Performance Concrete: From Fundamental to Applications. *Case Studies in Construction Materials*. 2018; 9. doi:10.1016/j.cscm.2018.e00197

4. Ng K. M., Tam C. M., Tam V. W. Studying the production process and mechanical properties of reactive powder concrete: A Hong Kong study. *Magazine of Concrete Research*. 2010; Vol.62. No. 9: 647-654. doi:10.1680/mac.9.00063

5. Shaheen E., Shrive N. Optimization of Mechanical Properties and Durability of Reactive Powder Concrete. *ACI Materials Journal*. 2006; 103 (6): 444-451. doi:10.14359/18222

6. Sadrekarimi A. Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2004; Vol. 2, No. 3: 409-417. doi:10.3151/jact.2.409

7. Aravindhan J., Vijayakumar G. Studies on strength characteristics of reactive powder concrete. *International Journal of Chemical Sciences*. 2016; 14 (S1): 149-154.

8. Tolstoy A. D., Lesovik V. S., Zagorodnyuk L. Kh., Kovaleva I. A. Poroshkovye betony s primeneniem tekhnogennogo syr'ya [Powder concretes using man-made raw materials]. *Vestnik MGSU*. 2015; 11: 101-109. (in Russ.)
9. Long G., Wang X., Xie Y. Very-high-performance concrete with ultrafine powders. *Cement and Concrete Research*. 2002; 32(4): 601-605. doi:10.1016/S0008-8846(01)00732-3
10. Velichko E., Shokodko E. Reactive powder concrete based on multicomponent cement systems with multilevel optimization of the disperse composition. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 251, 01042. doi:10.1051/mateconf/201825101042
11. Hamiruddin N. A., Razak R.A., Muhamad K. The Effect of Different Sand Gradation with Ultra High Performance Concrete (UHPC). 2018. Diffusion and Defect Data Pt. B: Solid State Phenomena. 280, 476-480. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.280.476
12. Tikkanen J., Penttala V., Cwirzen A. Mineral powder concrete – Effects of powder content on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*. 2011; 63 (12): 893-903 doi:10.1680/macr.10.00048
13. Bentz D. P., Conway J.T. Computer modelling of the replacement of «coarse» cement particles by inert fillers in low w/c ratio concretes: Hydration and strength. *Cement and Concrete Research*. 2001; 31(3): 503–506. doi:10.1016/S0008-8846(01)00456-2
14. Belov V. V., Obratsov I. V., Kulyaev P. V. Metodologiya proektirovaniya optimal'nykh struktur tsementnykh betonov [Methodology for Designing Optimal Cement Concrete Structures]. *Stroitel'nye materialy*. 2013; 3: 17-21. (in Russ.)
15. Entin Z. B., Nefedova D. S. O dispersnosti i granulometrii rossiiskikh i zarubezhnykh tsementov [Dispersion and granulometry of Russian and foreign cements]. *Tsement i ego primeneniye*. 2008; 3: 86-88. (in Russ.)
16. Aichin P. K., Uilson U., Mindess S. Uvelichenie prochnosti betonov, izgotovlennykh iz smeshannykh tsementov [Increased strength of concretes made of mixed cements]. *Tsement i ego primeneniye*. 2018; 5. 2018: 67-70. (in Russ.)
17. Kalashnikov V. I., Moskvina R. N., Belyakova E. A., Belyakova V. S., Petukhov A. V. Vyso-kodispersnye napolnители dlya poroshkovo-aktivirovannykh betonov novogo pokoleniya [Highly dispersed fillers for next-generation powder-activated concretes]. *Si-stemy. Metody. Tekhnologii*. 2014; 2 (22):113–118. (in Russ.)
18. Moosberg-Bustnes H. The function of fillers in concrete. *Materials and Structures*. 2004; 37(2): 74-81. doi:10.1617/13694
19. Dykin I. V., Velichko E. G., Eremin A. V. Poroshkovo-aktivirovannyye betony – mno-gourov-nevo-modifitsirovannyye tsementnyye sistemy [Powder-activated concretes - multilevel-modified cement systems]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. 2017; 3-4 (57): 37-40. (in Russ.)

20. Belov V. V., Smirnov M. A. Stroitel'nye kompozity iz optimizirovannykh mine-ral'nykh smesey: monografiya [Construction composites from optimized mineral mixtures: monograph]. Tver': TvGTU, 2012; 112. (in Russ.)

21. Anan'ev S. V., Kalashnikov V. I., Suzdal'tsev O. V., Dryanin R. A. Vliyanie tonkosti pomola i kachestva kvartseвого peska na prochnostnye svoystva poroshkovogo betona [Influence of fineness of grinding and quality of quartz sand on strength properties of powder concrete]. *Nauka i mir*. 2014; 8 (12): 34-36. (in Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Толыпина Н. М. Постановка задач исследования. Обобщение результатов работы, формулирование выводов. Редактирование статьи.

Халалева Е. Н. Выбор методологии и методов исследования. Выполнение экспериментальных исследований, обработка результатов.

Толыпин Д. А. Выполнение экспериментальных исследований, обработка результатов. Оформление статьи.

AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT

Natalia M. Tolypina. Formulation of research tasks. Generalization of the results of the work, formalization of conclusions. Editing the article.

Elena N. Khakhaleva. Choice of methodology and research methods. Performing experimental studies, processing the results.

Daniil A. Tolypin. Performing experimental studies, processing the results. The design of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Толыпина Наталья Максимовна – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, SPIN-код: 4650-2537.

Халалева Елена Николаевна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры строительства и городского хозяйства, SPIN-код: 7096-6955.

Толыпин Даниил Александрович – магистрант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalia M. Tolypina – Dr. of Sci., Associate Professor, Construction Materials Science, Products and Structures Department, SPIN-код: 4650-2537.

Elena N. Khakhaleva – Cand. of Sci., Associate Professor, Construction and Urban Economy Department, SPIN-код: 7096-6955.

Daniil A. Tolypin – Master's student, Construction Materials Science, Products and Structures Department.