

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-36-47

Губарев С.А., Загороднюк Л.Х., Агеева М.С., *Чернуха Д.Г., Чжан Сюань
Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова
*E-mail: callipso71@yandex.ru

ВЯЖУЩИЕ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ В СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТАХ

Аннотация. В современном строительстве широко используют свайные фундаменты вследствие их высокой несущей способности, надежности, эффективной работы на различных грунтах, отсутствия осадки, равномерного распределения нагрузки и высокой экономической эффективности. Для обеспечения вышеприведенных свойств необходимо создание мелкозернистых бетонов на эффективных композиционных вяжущих. Рассмотрена возможность применения техногенных продуктов: отходов мокрой магнитной сепарации и кварцитопесчаника при получении вяжущих композиций в различных помольных агрегатах: вибрационной и роторно-шаровой мельницах. Приведены исходные характеристики и микроструктуры сырьевых материалов. Установлено, что вяжущая композиция состава: цемент – 70 % и отходы мокрой магнитной сепарации – 30 %, приготовленного в вибрационной мельнице, обладает прочностью, соизмеримой с прочностью чистого цемента, что позволяет экономить до 30 % клинкерной составляющей цемента. Выявлено, что полученная вяжущая композиция состава: цемент – 50 % и кварцитопесчаник – 50 %, приготовленная в роторно-шаровой мельнице, имеет прочность, приближающуюся к прочности чистого цемента, что обеспечивает экономию портландцементного клинкера до 50 %. Результаты свидетельствуют об особенностях получения вяжущих композиций с использованием отходов мокрой магнитной сепарации и кварцитопесчаника в роторно-шаровой и вибрационной мельницах. Для дальнейшей модификации полученных вяжущих композиций целесообразно использовать пластифицирующие добавки. Использование отходов мокрой магнитной сепарации и кварцитопесчаника будет способствовать улучшению окружающей среды и экологической обстановки в целом, а также повысит качество готового продукта.

Ключевые слова: вяжущие композиции, вибрационная мельница, роторно-шаровая мельница, кварцитопесчанник, отходы мокрой магнитной сепарации, мелкозернистые бетоны, свайные фундаменты

Введение. В настоящее время вследствие интенсивного развития строительства [1–5] на фоне развивающихся технологий решается вопрос о разработке и использовании новых эффективных материалов, адаптированных к самым различным условиям эксплуатации [6–10], а также к различным природно-климатическим условиям нашей страны [11–13]. Накоплен значительный опыт по рациональному использованию природного сырья [14–16] и техногенных продуктов [17–21] при создании композиционных вяжущих для использования при приготовлении бетонов самого различного назначения. Получение высокоэффективных вяжущих веществ с требуемыми свойствами сопровождается применением сложных составов компонентов с целью получения высококачественных бетонов с требуемыми технологическими, физико-механическими и функциональными свойствами, а также созданием целевой структуры, определяющей прочностные свойства. Для разработки таких вяжущих необходимы целенаправленные технологии получения на всех этапах: выбор и применение минеральных наполнителей, разработка рациональных составов, использование функциональных химических добавок, а также

применение эффективных технологических решений [22–26]. Лесовик Р.В. установил, что отходы мокрой магнитной сепарации и кварцитопесчаник целесообразно использовать в составах композиционных вяжущих, получая при этом вяжущее с высокими физико-механическими свойствами [27]. Автором было установлено, что для повышения качества матрицы необходим домол цемента с учетом технологических факторов, а также используемых кремнеземистых компонентов и органических добавок. Все исследования проводились в лабораторной двухкамерной мельнице, при этом были получены результаты, обусловленные применяемым помольным агрегатом. В связи с появлением современных мельниц: вибрационной и роторно-шаровой представляло интерес получить вяжущую композицию на основе портландцемента и минеральных наполнителей в виде отходов мокрой магнитной сепарации и кварцитопесчаников в этих мельницах.

В современном строительстве широкое применение получили свайные фундаменты вследствие целого ряда достоинств: высокой несущей способности и надежности, эффективности работы на сложных и слабых грунтах, отсутствия осадки и равномерном распределении нагрузки, а также высокой экономической эффективности

[28–32]. Эти фундаменты обладают высокой универсальностью и вариативностью, обеспечивают хорошее сопротивление сейсмическим и динамическим нагрузкам, надежно работают во влажных условиях, а также позволяют вести строительство в любое время года при обеспечении высоких темпов строительства [33–37]. Для создания высокопрочных свайных фундаментов требуются мелкозернистые бетоны с использованием качественных вяжущих материалов. Разработка и использование современных композиционных вяжущих позволяет решать ряд проблем, касающихся строительства в целом и фундаментных конструкций, в частности. Замена традиционного цемента на композиционные вяжущие с использованием техногенных отходов, эффективность которых доказана многочисленными исследованиями [7, 17, 21, 26, 27], позволяет повышать физико-механические и эксплуатационные характеристики бетонов на их основе, а также значительно экономить на сырьевых компонентах.

Учитывая, что композиционное вяжущее включает портландцемент, минеральный компо-

нент и органическую добавку, представляло интерес установить рациональные составы с использованием отходов мокрой магнитной сепарации и кварцитопесчаника, приготовленных в вибрационной и роторно-шаровой мельницах, обеспечивающих экономию дорогостоящего энергоемкого клинкера, названный в данной работе вяжущей композицией. На последующем этапе работы предусматривается модификация вяжущей композиции наилучшего состава для получения мелкозернистого бетона для свайных фундаментов.

Материалы и методы. При приготовлении вяжущих композиций применяли следующие сырьевые материалы: портландцемент ЦЕМ 0 42,5Н (ПЦ), отходы мокрой магнитной сепарации (ММС) и кварцитопесчаник (КВП) Лебединского ГОКа (Белгородской области). Основные физико-механические характеристики и химический состав портландцемента приведены в таблицах 1, 2. Качество портландцемента определяли по ГОСТ 30744-2001* «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка».

Таблица 1

Химический состав ЦЕМ 0 42,5Н ЗАО «Белгородский цемент»

Марка цемента	Химический состав, масс. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Прочее
ЦЕМ 0 42,5Н	19,02	4,90	3,42	65,98	1,45	3,44	0,57	1,22

Таблица 2

Строительно-технические характеристики портландцемента

Наименование показателя	ЦЕМ 0 42,5Н «Белгородский цемент»
Минеральный состав клинкера, масс. %	
C ₃ S	59,0
C ₂ S	18,8
C ₃ A	7,0
C ₄ AF	13,1
Удельная поверхность, м ² /кг	330
Нормальная густота цементного теста, %	25,6
Сроки схватывания, мин, начало/конец	95/308
Предел прочности в возрасте 2 сут, МПа: изгиб/сжатие	5,8/19,2
Предел прочности в возрасте 28 сут, МПа: изгиб/сжатие	8,1/50,1
Предел прочности при сжатии после тепловлажностной обработки, МПа	39,5
Тонкость помола, остаток на сите № 008, %	7,0
Удельная эффективная активность естественных радионуклидов A _{эфф} , Бк/кг	2,42

В качестве минеральных наполнителей использовали отходы мокрой магнитной сепарации и кварцитопесчаник. Химический и минеральный составы отходов ММС и кварцитопесчаника

приведены в таблицах 3–5. Кварцитопесчаник характеризуется высоким содержанием кремнезема, оксидов алюминия и железа.

Таблица 3

Химический состав отходов ММС, %

Fe _{общ}	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	S	P	CO ₂
10,2	77,72	0,57	6,58	7,12	1,48	2,26	0,128	0,023	3,63

Таблица 4

Минеральный состав отходов ММС, %

Кварц	Гематит	Магнетит	Силикаты	Карбонаты
65–70	6–11	2–6	9–12	6–13

Таблица 5

Химический состав кварцитопесчаника, %

Fe _{общ}	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	P ₂ O ₅	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	S	п.п.п
1,24	0,97	93,90	1,42	0,1	0,86	1,33	0,08	0,03	0,31	0,16	0,06	0,74

Определен минеральный состав и установлено, что кварцитопесчаник представлен кварцем до 95 %, кроме того, в нем содержится до 5 % слюды. Отходы ММС по минеральному составу характеризуются содержанием кварца до 70 %, кальцита до 10 % и магнетита до 10%. Использование таких сырьевых материалов при

приготовлении композиционных вяжущих обеспечит определенные специфические особенности при приготовлении и синтезе создаваемых композитов.

Микроструктуры проб отходов ММС и кварцитопесчаника приведены на рисунке 1.

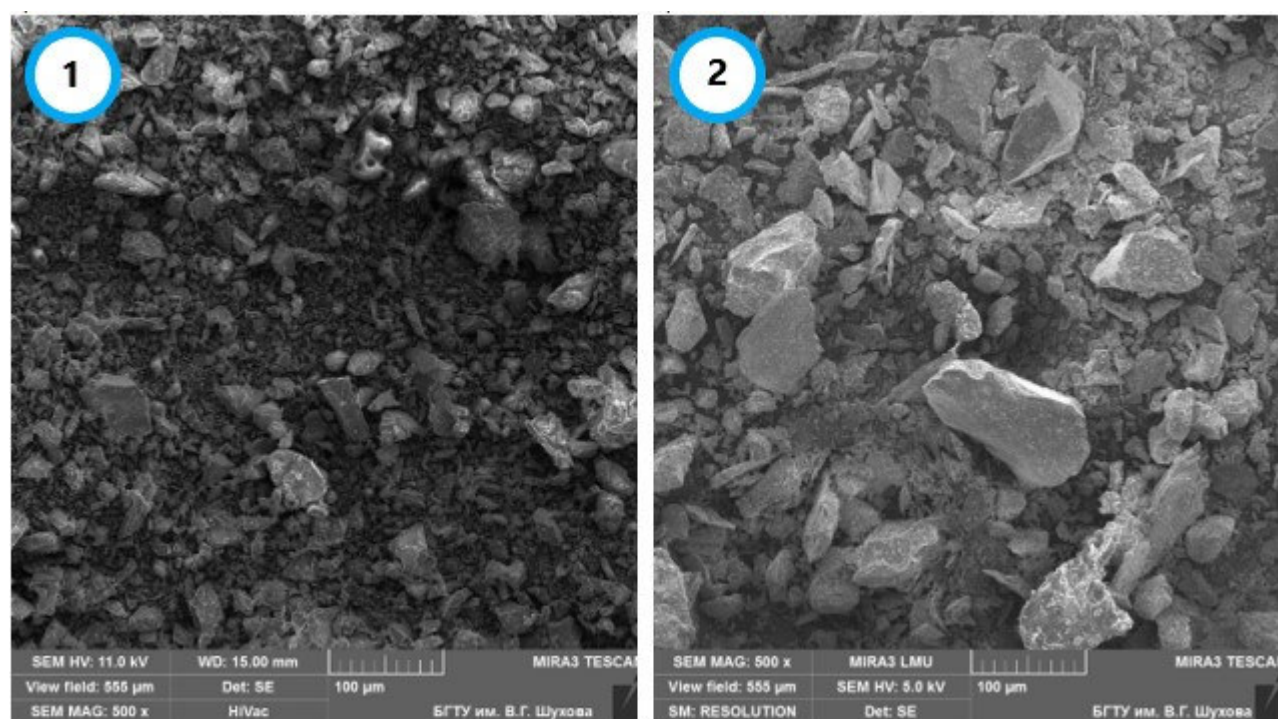


Рис. 1. Микроструктуры проб отходов ММС (1) и кварцитопесчаника (2)

Анализ микроструктур минеральных наполнителей при одинаковом увеличении свидетельствует, что отходы ММС характеризуются мелкозернистой структурой и достаточно равномерным распределением частиц по всему объему материала.

В работе использована водопроводная вода в соответствии с ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия» с рН 7.1.

В качестве помольных агрегатов приняты лабораторные мельницы: вибрационная (ВМ) и роторно-шаровая (РШМ).

Основная часть. Вяжущие композиции готовили в различных помольных агрегатах, при различном соотношении портландцемента и минеральных наполнителей, и при различных продолжительностях помола, составы которых приведены в таблице 6. При выполнении работы производили помол в различных агрегатах в диа-

пазоне от 10 до 50 минут, с целью получения рациональной удельной поверхности при минимальном времени помола.

Гранулометрический состав исходного цемента приведен на рисунке 2. Гранулометрические составы полученных вяжущих композиций приведены на рисунке 3.

Таблица 6

Удельные поверхности вяжущих композиций разных составов, полученных в различных мельницах

№ состава	Состав	Соотношение ЦЕМ и ММС/КВП	Мельница	Удельная поверхность, м ² /кг
1	ЦЕМ+ММС	50/50	роторно-шаровая	911,4
2	ЦЕМ+ММС	70/30	роторно-шаровая	630,5
3	ЦЕМ+ММС	50/50	вибрационная	848,8
4	ЦЕМ+ММС	70/30	вибрационная	588,0
5	ЦЕМ+КВП	50/50	роторно-шаровая	740,4
6	ЦЕМ+КВП	70/30	роторно-шаровая	759,0
7	ЦЕМ+КВП	50/50	вибрационная	489,0
8	ЦЕМ+КВП	70/30	вибрационная	507,0

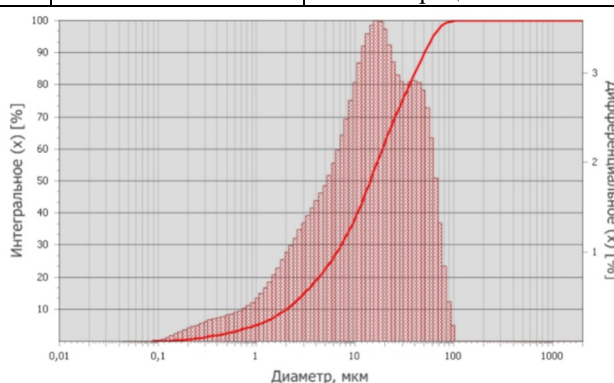
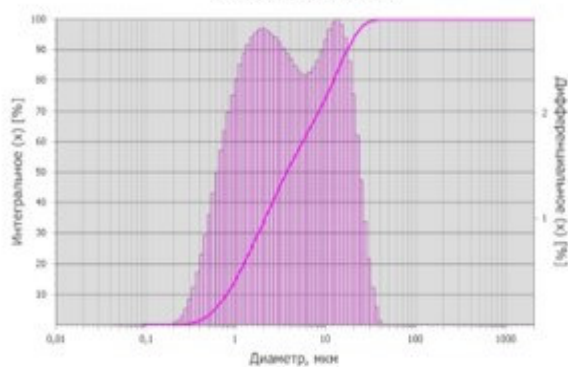
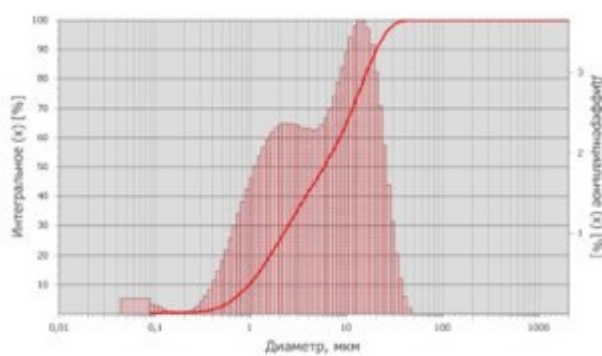


Рис. 2. Распределение частиц цемента по размерам

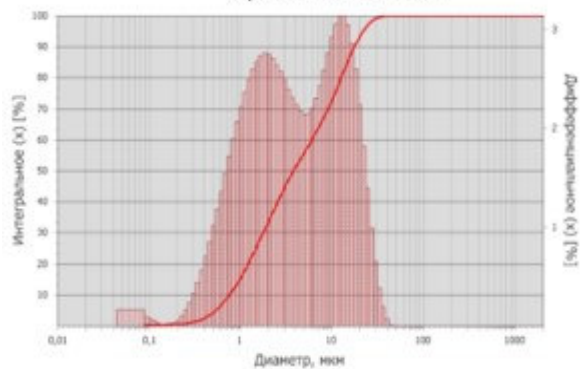
а) КВП в РШМ



б) КВП в ВМ



в) ММС в РШМ



г) ММС в ВМ

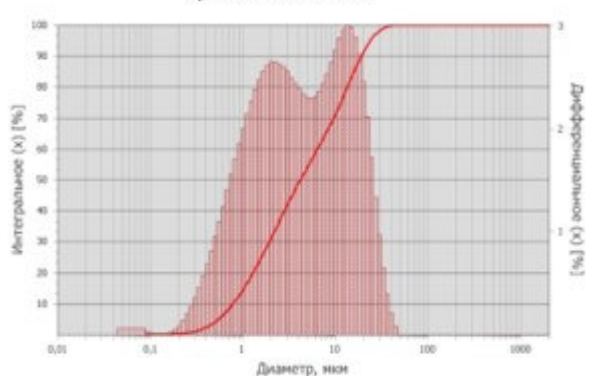


Рис. 3. Распределение частиц вяжущих композиций по размерам

Исследования гранулометрических составов вяжущих композиций показали, что наиболее эффективной мельницей является роторно-шаровая при соотношении портландцемента и отходов ММС 1:1, обеспечивающим получение состава с удельной поверхностью $911,4 \text{ м}^2/\text{кг}$. При использовании роторно-шаровой мельницы при приготовлении вяжущих композиций из цемента и

кварцитопесчаника обеспечиваются достаточно высокие показатели удельной поверхности до $740,4\text{--}759,0 \text{ м}^2/\text{кг}$.

График изменения удельной поверхности при помоле различных составов вяжущих композиций в вибрационной мельнице приведен на рисунке 4.

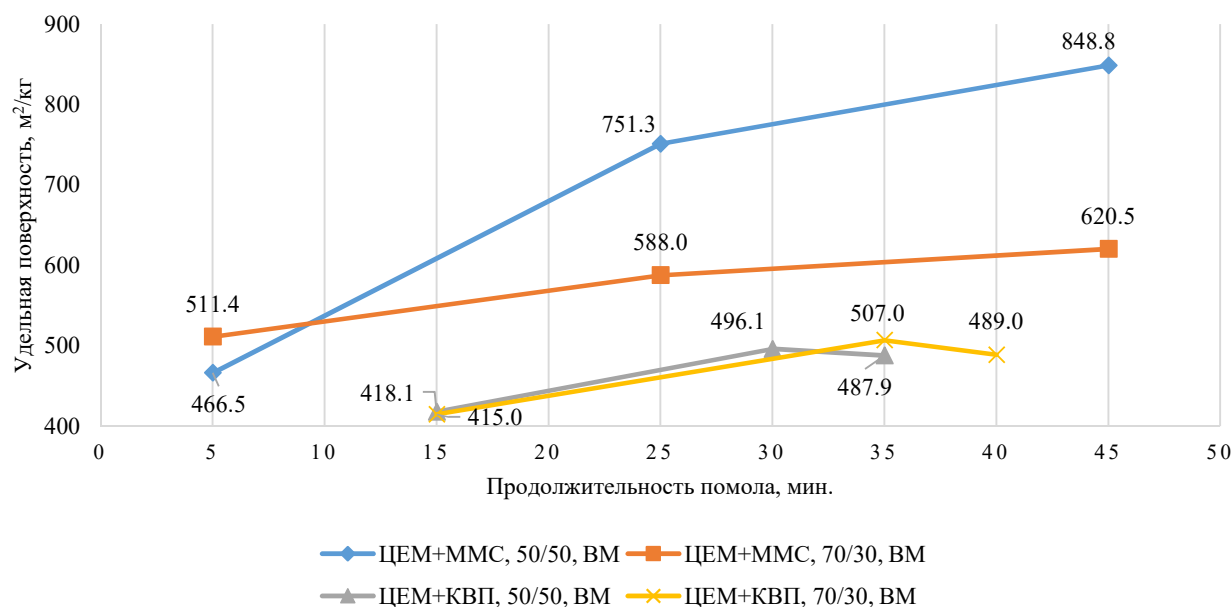


Рис. 4. График изменения удельной поверхности при помоле составов в вибрационной мельнице

Анализ изменений удельных поверхностей различных составов показывает, что наиболее эффективным является состав при соотношении портландцемента и отходов ММС 50/50, обеспечивающий удельную поверхность $848,8 \text{ м}^2/\text{кг}$. Отмечается, что состав, приготовленный при соотношении цемента 70 % и отходов мокрой магнитной сепарации 30 %, дает меньший показатель удельной поверхности, что, вероятно, связано с перераспределением зернистой и дисперсной фаз, влияющих на измельчение. Использование в качестве минерального наполнителя вяжущих композиций кварцитопесчаника при помоле в вибрационной мельнице показывает незначительный прирост удельной поверхности, что и определяет нецелесообразность их использования при приготовлении вяжущих композиций.

Анализ изменений удельной поверхности вяжущих композиций, приготовленных на различных минеральных наполнителях в роторно-шаровой мельнице показывает, что повышенный интерес вызывает состав с отходами ММС при продолжительности измельчения 10 минут, обеспечивающий удельную поверхность $911,4 \text{ м}^2/\text{кг}$. Дальнейший помол этого состава нецелесообразен (рис. 5).

С целью исследования физико-механических свойств полученных вяжущих композиций

были заформованы образцы из исходного цементного теста и вяжущих композиций, полученных в различных помольных агрегатах. При формировании образцов использовали нормальную густоту 28 %.

Результаты физико-механических испытаний образцов представлены на рисунках 6,7.

Результаты физико-механических испытаний образцов вяжущих композиций на основе портландцемента и отходов ММС, полученных в вибрационной мельнице, показали, что при содержании до 30 % отходов ММС возможно заменять до 30 % портландцемента в составах, обеспечивая при этом требуемую прочность композита. Однако, введение отходов ММС в вяжущие композиции при помоле в роторно-шаровой мельнице не обеспечивает высокой прочности, что, по-видимому, связано с недостатком вяжущего для покрытия образовавшихся высокодисперсных фаз.

Анализируя показатели прочности вяжущих композиций, полученных в вибрационной мельнице с кварцитопесчаником, следует отметить, что с увеличением количества минерального наполнителя прочность снижается. В свою очередь, при помоле в роторно-шаровой мельнице целесообразно вводить в состав композицион-

ных вяжущих до 50% кварцитопесчаника: прочность вяжущих композиций в этом случае приближается к прочности цемента. Повышение прочности этого состава, вероятно, связано с тем, что часть кварцитопесчаника выступает в качестве каркаса создаваемого композита, а другая,

дисперсная часть, находясь в составе вяжущей композиции, вследствие закона сродства структур, обеспечивает дополнительную прочную структурную связь всего вяжущего.

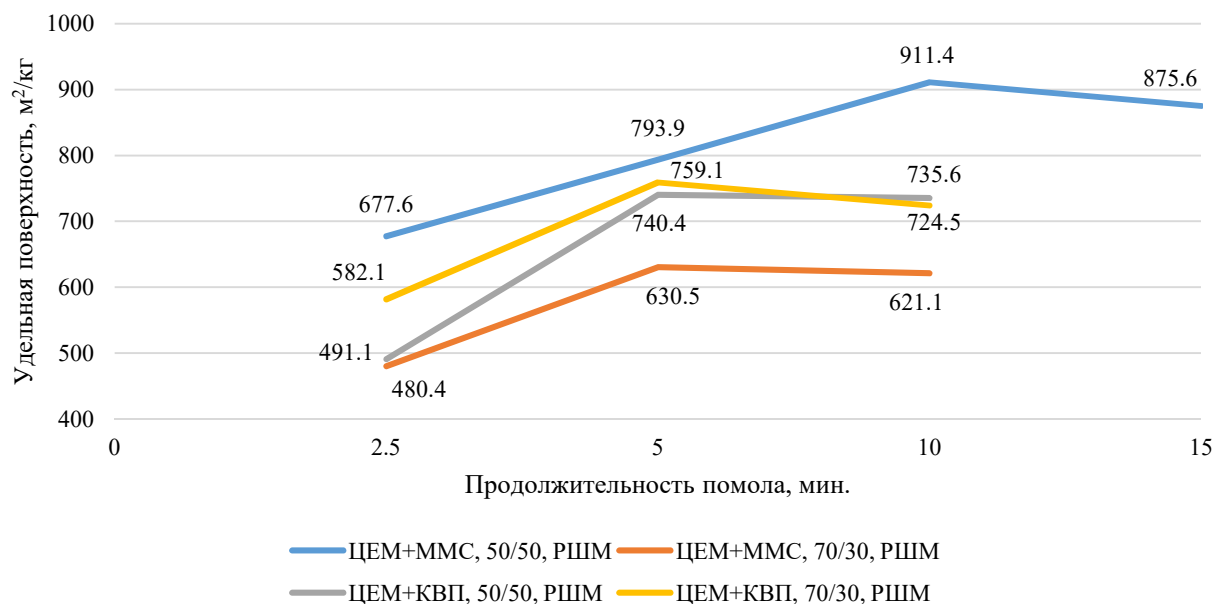


Рис. 5. График изменения удельной поверхности при помоле в роторно-шаровой мельнице
Отходы мокрой магнитной сепарации

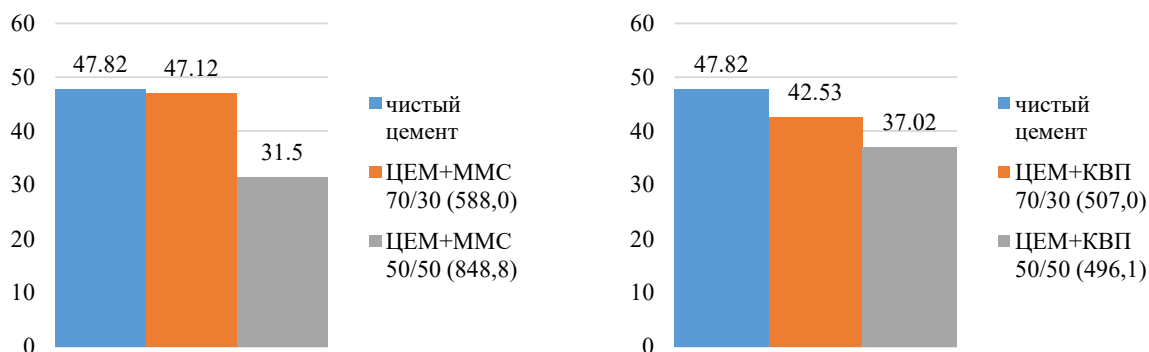


Рис. 6. Показатели прочности составов с ММС и КВП в различных соотношениях, полученных в вибрационной мельнице (при различных удельных поверхностях)
Отходы мокрой магнитной сепарации

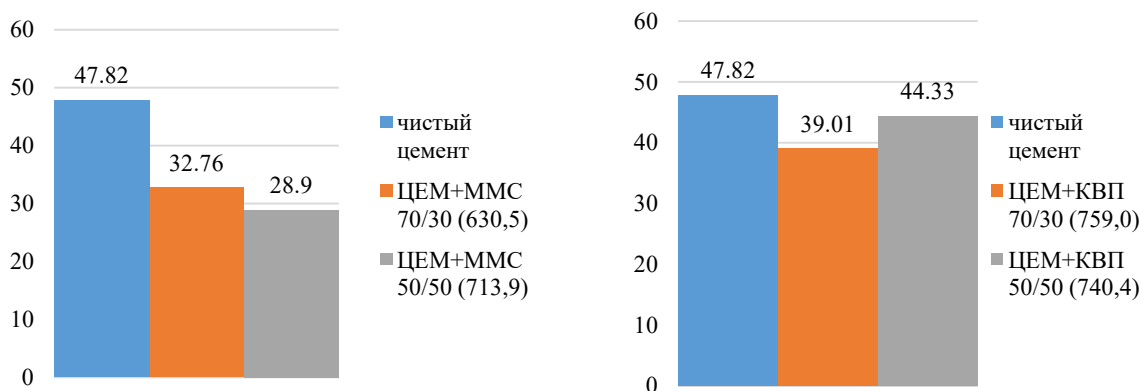


Рис. 7. Показатели прочности составов с ММС и КВП в различных соотношениях, полученных в роторно-шаровой мельнице (при различных удельных поверхностях)

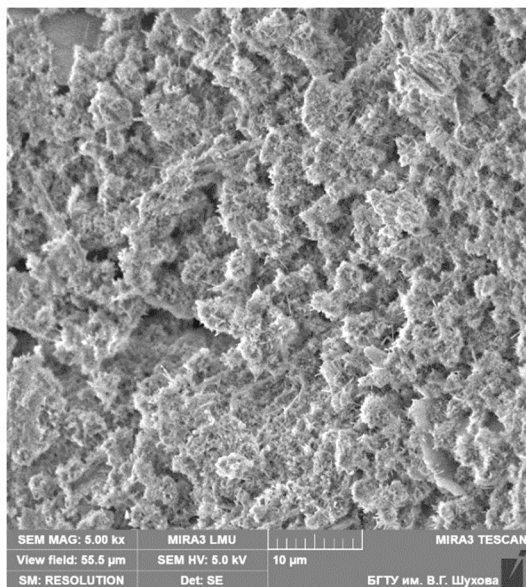


Рис. 6. Микроструктура вяжущей композиции состава: цемент – 70 % + отходы мокрой магнитной сепарации – 30 %, приготовленного в вибрационной мельнице

Принимая во внимание научные результаты, полученные Лесовиком Р.В. в работах [16, 27] наиболее рекомендуемыми составами для получения композиционных вяжущих, были рекомендованы рецептуры с заменой клинкерной составляющей 30 % и 50 % при приготовлении композиционных вяжущих для мелкозернистых бетонов. При выполнении настоящей работы ставилась задача получения вяжущей композиции с использованием вибрационной и роторно-шаровой мельниц. На основании полученных результатов и установления рациональных составов с использованием отходов ММС и кварцитопесчаника целесообразно провести серию экспериментов по сокращению расхода минеральной составляющей, а также модификации смеси суперпластификаторами.

Изучены микроструктуры проб вяжущих композиций наилучших составов: 1) цемент – 70 % + отходы ММС – 30 %, приготовленного в вибрационной мельнице (рис. 6) и 2) цемент – 50 % + кварцитопесчаник – 50 %, полученного в роторно-шаровой мельнице (рис. 7).

Основным структурным элементом композита является скелетная часть. Основной каркас представлен отдельными зёрнами минерального наполнителя, плотно обросшими новообразованиями, которые представляют собой продукты гидратации вяжущей композиции различной дисперсности и морфологии. Имеющиеся пустоты достаточно плотно заполнены удлиненными кристаллами столбчатой и нитевидной форм. Размеры кристаллов составляют 3–4 мкм в длину и 0,1 мкм в ширину. Отмечается высокая насыщенность раствора, заполняющего поры композита.

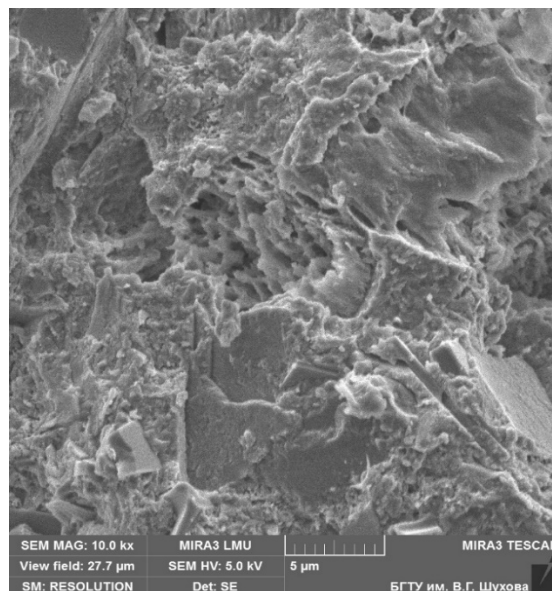


Рис. 7. Микроструктура вяжущей композиции состава: цемент – 50% + кварцитопесчаник – 50 %, приготовленного в роторно-шаровой мельнице

Микроструктура матрицы вяжущей композиции – плотная, землистая. Уменьшенное содержание клинкерной составляющей приводит к тому, что основная масса образца формируется из отдельных агрегатов в виде образований – хлопьев. Контактные зоны между зёрнами минерального наполнителя достаточно плотно срослись и окружены незначительным поровым пространством. Отмечается высокая степень кристаллизации на поверхности минерального наполнителя, матрица достаточно плотная, мелкозернистая, глобулярная, на которой активно прорастают кристаллические новообразования, свидетельствующие об активном протекании процессов гидратации.

Выводы. На основании полученных результатов, можно сделать вывод, что вяжущая композиция состава: цемент – 70 % и отходы ММС – 30 %, приготовленная в вибрационной мельнице, характеризуется прочностью, соизмеримой с показателями бездобавочного цемента, что позволяет экономить до 30 % клинкерной составляющей цемента. Полученная вяжущая композиция состава: цемент – 50 % и кварцитопесчаник – 50 %, приготовленная в роторно-шаровой мельнице, обеспечивает экономию до 50 % портландцементного клинкера и имеет прочность, приближающуюся к прочности бездобавочного цемента. Полученные результаты свидетельствуют об особенностях помола минеральных наполнителей: отходов ММС и кварцитопесчаника в роторно-шаровой и вибрационной мельницах. Для дальнейшей модификации полученных вяжущих композиций целесообразно использовать пластифицирующие добавки.

Благодарность. Работа выполнена с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик В.С., Алфимова Н.И., Яковлев Е.А., Шейченко М.С. К проблеме повышения эффективности композиционных вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2009. № 1. С. 30–33.
2. Алфимова Н.И., Лесовик В.С., Савин А.В., Шадский Е.Е. Перспективы применения композиционных вяжущих при производстве железобетонных изделий // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 5 (88). С. 95–99.
3. Каприелов С.С., Кардунян Г.С. Новые модифицированные бетоны в современных сооружениях // Бетон и железобетон. Оборудование. Материалы. Технологии. 2011. Вып. 1. С. 78–82.
4. Строкова В.В., Нелюбова В.В., Боцман Л.Н., Огурцова Ю.Н., Хахалева Е.Н. Композиционное вяжущее для монолитного строительства в северных регионах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 42–46.
5. Крамар Л.Я., Кудяков А.И., Трофимов Б.Я., Шулдяков К.В. Цементные тяжелые бетоны для строительства скоростных автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 4(63). С. 147–157. EDN ZDDEGX.
6. Kasper E.A., Bochkareva O.S. Fine-grained concretes, dispersed reinforced with basalt fiber // Systems. Methods. Technologies. 2015. № 4. Pp. 102–106.
7. Алфимова Н.И., Вишневская Я.Ю., Трунов П.В. Композиционные вяжущие и изделия с использованием техногенного сырья: монография. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 127 с.
8. Lesovik R.V., Zhang X. Fine-grained concrete on composite binder for piling foundations considering natural and climatic conditions of China // The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2025. Vol. 22. No. 4. Pp. 672–683. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-4-672-683
9. Баженов Ю.М., Алимов Л.А., Воронин В.В. Развитие теории формирования структуры и свойств бетонов с техногенными отходами // Известия высших учебных заведений. Строительство. 1996. № 7. С. 55–58.
10. Кудяков А.И. Управление процессами структурообразования и качеством бетона на мелкозернистых песках: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Л.: ЛИСИ, 1990. 49 с.
11. Shi Z., Yang J., Li Z., et al. Comprehensive Management of Soil and Water Loss in the Low Mountain and Hilly Areas of Southern Red Soil Regions // Journal of Soil and Water Conservation. 2018. Vol. 32. No. 1. Pp. 1–10.
12. Artigues J.C., Curado J., Iglesias E. Impermeability and resistance to carbonation of concrete with microsilica and water-reducing agents // Admixtures for Concrete. Improvement of Properties: Proceedings of the International Symposium held by RILEM. London: Chapman and Hall, 1990. Pp. 229–240.
13. Newman J., Choo B.S. (Eds.) Advanced Concrete Technology // Constituent Materials. Elsevier, 2003. 280 p.
14. Попов А.Л., Строкова В.В., Нелюбова В.В. Особенности композиционного вяжущего на кварц-полевошпатовом песке // Строительство и техногенная безопасность. 2018. № 12 (64). С. 63–69.
15. Трунов П.В. Композиционные вяжущие с использованием вулканогенно-осадочных пород Камчатки и мелкозернистые бетоны на их основе: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2014. 16 с.
16. Байджанов Д.О., Абдрахманова К.А. Влияние добавок и наполнителей на свойства бетона для свай, работающих в водонасыщенных грунтах // Труды Карагандинского государственного технического университета. 2019. № 2(75). С. 72–75.
17. Шейченко М.С., Лесовик В.С., Алфимова Н.И. Композиционные вяжущие с использованием высокомагнезиальных отходов Ковдорского месторождения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 1. С. 10–14.
18. Лесовик Р.В., Ключев А.В., Ключев С.В. Мелкозернистый сталефибробетон на основе техногенного песка для получения сборных элементов конструкций // Технология бетонов. 2014. № 2 (91). С. 44–45.
19. Baranova A.A. Cellular and fine-grained concrete based on silica with dispersed reinforcement // Mekhanika i Tekhnologii (Mechanics and Technologies). 2023. No. 4(82). Pp. 83–91. DOI: 10.55956/QMMZ3329.
20. Sanchez F., Borwankar A. Multi-scale performance of carbon microfiber reinforced cement-based composites exposed to a decalcifying environment // Materials Science and Engineering: A. 2010. Vol. 527. No. 13–14. Pp. 3151–3158.
21. Хириш Н.С. Высоконаполненный мелкозернистый бетон на основе техногенных отходов металлургии: дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2014. 144 с.
22. Баженов Ю.М. Новому веку – новые бетоны // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2000. № 2. С. 10–11.

23. Judowitsch B.E., Dmitrijew A.M., Subechin S.A. et al. Das Zement der niedrigen Wasserbedarf – das zusammenziehende Stoff der neuen Generation // *Nauka i Technika (Wissenschaft und Technik)*. 1994. Pp. 15–18.

24. Judowitsch B.E., Dmitrijew A.M., Subechin S.A. et al. Zemente des niedrigen Wasserbedarfs – Zusammenziehende Stoffe der neuen Generation // *Zement und seine Verwendung*. 1999. No. 4. Pp. 15–18.

25. Трунов П.В., Алфимова Н.И., Вишневская Я.Ю., Евтушенко Е.И. Влияние способа помола на энергоёмкость изготовления и качественные характеристики композиционных вяжущих // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2012. № 4. С. 37–39.

26. Шкарин А.В., Загороднюк Л.Х., Щекина А.Ю., Лугинина И.Г. Получение композиционных вяжущих в различных помольных агрегатах // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова: материалы Междунар. науч.-практ. конф.* 2012. № 9. С. 89–92.

27. Лесовик Р.В. Мелкозернистые бетоны на основе композиционных вяжущих техногенных песков: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. 567 с.

28. Соболев Е.С., Сидоров В.В. Взаимодействие свай и окружающего грунта при вибрационном погружении // *Вестник МГСУ*. 2018. № 3 (114). С. 293–300.

29. Байджанов Д.О., Абдрахманова К.А. Влияние добавок и наполнителей на свойства бетона для свай, работающих в водонасыщенных грунтах // *Труды Карагандинского государственного технического университета*. 2019. № 2(75). С. 72–75.

30. Вшивков А.С., Бочкарева Т.М. Применение композитных материалов в технологии

устройства буронабивных свай в обсадных трубах // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. 2016. № 2. С. 69–74.

31. Тер-Мартirosян А.З., Ле Д.А., Манукян А.В. Влияние разжижения грунтов на расчетную несущую способность свай // *Вестник МГСУ*. 2020. № 5. С. 655–664.

32. Готман А.Л. Экспериментальные исследования работы комбинированных свайных фундаментов на действие горизонтальной нагрузки // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2014. № 3. С. 2–6.

33. Хрусталева Л.Н., Емельянова Л.В. Прогноз устойчивости свайного фундамента по результатам температурных наблюдений в расположенной рядом с фундаментом скважине // *Криосфера Земли*. 2025. Т. 29. № 1. С. 66–73.

34. Tang J. Application of Cast-in-Place Piles and Prefabricated Piles in Road and Bridge Foundation Construction // *China Kitchen & Bathroom*. 2021. No. 9. Pp. 55–56.

35. Старцева С.С., Путина Ю.А. Применение винтовых свайных фундаментов в современном строительстве // *Молодежь и наука: материалы XX междунар. науч.-практ. конф. старшеклассников, студентов и аспирантов: в 2 т. Нижний Тагил: Уральский федеральный университет*, 2024. С. 165–167.

36. Сергиенко А.В. Свайные фундаменты: новые технологии и конструкции // *Фундаменты*. 2023. № 4(14). С. 52–54.

37. Zhang W. Comparative Analysis of Settlement Calculations for Pile Foundations Based on American and Chinese Standards // *Comprehensive Utilization of Fly Ash*. 2022. No. 3. Pp. 1–10. DOI: 10.58339.

Информация об авторах

Губарев Сергей Александрович, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: gubarev.sereja@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Загороднюк Лилия Хасановна, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: lhz47@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Агеева Марина Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: ageevams@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чернуха Данил Григорьевич, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: cherrykursk@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чжан Сюань, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: 532339133@qq.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 11.09.2025 г.

© Губарев С.А., Загороднюк Л.Х., Агеева М.С., Чернуха Д.Г., Чжан Сюань, 2025

Gubarev S.A., Zagorodnyuk L.Kh., Ageeva M.S., *Chernukha D.G., Zhang Xuan

Belgorod State Technological University named after. V. G. Shukhova

**E-mail: callipso71@yandex.ru*

BINDING COMPOSITIONS FOR FINE-GRAINED CONCRETE IN PILE FOUNDATIONS

Abstract. *In modern construction, pile foundations are widely used due to their high bearing capacity, reliability, efficient operation on various soils, absence of settlement, uniform load distribution and high economic efficiency. To ensure the above properties, it is necessary to create fine-grained concrete on effective composite binders. The possibility of using man-made products is considered: waste from wet magnetic separation and quartzite sandstone in obtaining binder compositions in various grinding units: vibration and rotary ball mills. The initial characteristics and microstructures of raw materials are given. It was found that the binder composition of the composition: cement – 70 % and waste from wet magnetic separation – 30 %, prepared in a vibration mill, has a strength comparable to the strength of pure cement, which allows saving up to 30 % of the clinker component of cement. It was revealed that the obtained binder composition of the following composition: cement – 50 % and quartzite sandstone – 50 %, prepared in a rotary ball mill, provides savings of up to 50 % of Portland cement clinker and has a strength approaching the strength of pure cement, which ensures savings of Portland cement clinker up to 50 %. The results indicate the features of obtaining binder compositions using waste from wet magnetic separation and quartzite sandstone in rotary ball and vibration mills. For further modification of the obtained binder compositions, it is advisable to use plasticizing additives. The use of waste from wet magnetic separation and quartzite sandstone will contribute to improving the environment and the ecological situation as a whole, and will also improve the quality of the finished product.*

Keywords: *binders, vibration mill, rotary ball mill, quartzite sandstone, wet magnetic separation waste, fine-grained concrete, pile foundations.*

REFERENCES

1. Lesovik V.S., Alfimova N.I., Yakovlev E.A., Sheychenko M.S. To the problem of increasing the efficiency of composite binders [K probleme povysheniya effektivnosti kompozitsionnykh vyazhushchikh]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2009. No. 1. Pp. 30–33. (rus)
2. Alfimova N.I., Lesovik V.S., Savin A.V., Shadskiy E.E. Prospects for the use of composite binders in the production of reinforced concrete products [Perspektivy primeneniya kompozitsionnykh vyazhushchikh pri proizvodstve zhelezobetonnykh izdeliy]. Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2014. No. 5 (88). Pp. 95–99. (rus)
3. Kaprielov S.S., Kardumyan G.S. New modified concretes in modern structures [Novye modifitsirovannye betony v sovremennykh sooruzheniyakh]. Beton i zhelezobeton. Oborudovanie. Materialy. Tekhnologii. 2011. No. 1. Pp. 78–82. (rus)
4. Strokova V.V., Nelyubova V.V., Botsman L.N., Ogurtsova Yu.N., Khakhaleva E.N. Composite binder for monolithic construction in the northern regions [Kompozitsionnoe vyazhushchee dlya monolitnogo stroitelstva v severnykh regionakh]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 11. Pp. 42–46. (rus)
5. Kramar L.Ya., Kudyakov A.I., Trofimov B.Ya., Shuldyakov K.V. Cement heavy concretes for the construction of high-speed highways [Tsementnye tyazhelye betony dlya stroitelstva skorostnykh avtomobilnykh dorog]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2017. No. 4(63). Pp. 147–157. EDN ZDDEGX. (rus)
6. Kasper E.A., Bochkareva O.S. Fine-grained concretes, dispersed reinforced with basalt fiber. Systems. Methods. Technologies. 2015. No. 4. Pp. 102–106.
7. Alfimova N.I., Vishnevskaya Ya.Yu., Trunov P.V. Composite binders and products using technogenic raw materials [Kompozitsionnye vyazhushchie i izdeliya s ispolzovaniem tekhnogen'nogo syrya]: monograph. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 127 p. ISBN 978-3-659-35755-8. (rus)
8. Lesovik R.V., Zhang X. Fine-grained concrete on composite binder for piling foundations considering natural and climatic conditions of China. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2025. Vol. 22. No. 4. Pp. 672–683. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-4-672-683
9. Bazhenov Yu.M., Alimov L.A., Voronin V.V. Development of the theory of structure formation and properties of concretes with industrial waste [Razvitie teorii formirovaniya struktury i svoystv betonov s tekhnogennymi otkhodami].

Izvestiya vuzov. Stroitelstvo. 1996. No. 7. Pp. 55–58. (rus)

10. Kudyakov A.I. Management of structure formation processes and quality of concrete on fine-grained sands [Upravlenie protsessami strukturoobrazovaniya i kachestvom betona na melkozernistyykh peskakh]: abstract of thesis ... doct. tech. sciences. L.: LISI, 1990. 49 p. (rus)

11. Shi Z., Yang J., Li Z., et al. Comprehensive Management of Soil and Water Loss in the Low Mountain and Hilly Areas of Southern Red Soil Regions. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2018. Vol. 32. No. 1. Pp. 1–10.

12. Artigues J.C., Curado J., Iglesias E. Impermeability and resistance to carbonation of concrete with microsilica and water-reducing agents. *Admixtures for Concrete. Improvement of Properties: Proceedings of the International Symposium held by RILEM*. London: Chapman and Hall, 1990. Pp. 229–240.

13. Newman J., Choo B.S. (Eds.) *Advanced Concrete Technology. Constituent Materials*. Elsevier, 2003. 280 p.

14. Popov A.L., Strokova V.V., Nelyubova V.V. Features of composite binder on quartz-feldspar sand [Osobennosti kompozitsionnogo vyazhushchego na kvarts-polevoshpatovom peske]. *Stroitelstvo i tekhnogennaya bezopasnost*. 2018. No. 12 (64). Pp. 63–69. (rus)

15. Trunov P.V. Composite binders using volcanic-sedimentary rocks of Kamchatka and fine-grained concretes based on them [Kompozitsionnye vyazhushchie s ispolzovaniem vulkanogenno-osadochnyykh porod Kamchatki i melkozernistye betony na ikh osnove]: abstract of thesis ... cand. tech. sciences. Belgorod, 2014. 16 p. (rus)

16. Baidzhanov D.O., Abdrakhmanova K.A. Influence of additives and fillers on the properties of concrete for piles operating in water-saturated soils [Vliyanie dobavok i napolniteley na svoystva betona dlya svay rabotayushchikh v vodonasyshchennykh gruntakh]. *Trudy Karagandinskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019. No. 2(75). Pp. 72–75. (rus)

17. Sheychenko M.S., Lesovik V.S., Alfimova N.I. Composite binders using high-magnesium waste from the Kovdor deposit [Kompozitsionnye vyazhushchie s ispolzovaniem vysokomagnezionalnykh otkhodov Kovdorskogo mestorozhdeniya]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2011. No. 1. Pp. 10–14. (rus)

18. Lesovik R.V., Klyuev A.V., Klyuev S.V. Fine-grained steel fiber concrete based on technogenic sand for the production of precast structural elements [Melkozernistyy stalefibrobeton na osnove tekhnogennogo peska dlya polucheniya sbornykh

elementov konstruktsiy]. *Tekhnologiya betonov*. 2014. No. 2 (91). Pp. 44–45. (rus)

19. Baranova A.A. Cellular and fine-grained concrete based on silica with dispersed reinforcement. *Mekhanika i Tekhnologii (Mechanics and Technologies)*. 2023. No. 4(82). Pp. 83–91. DOI: 10.55956/QMMZ3329.

20. Sanchez F., Borwankar A. Multi-scale performance of carbon microfiber reinforced cement-based composites exposed to a decalcifying environment. *Materials Science and Engineering: A*. 2010. Vol. 527. No. 13–14. Pp. 3151–3158.

21. Khiris N.S. Highly filled fine-grained concrete based on industrial waste from metallurgy [Vysokonaplnenniy melkozernistiy beton na osnove tekhnogennykh otkhodov metallurgii]: thesis ... cand. tech. sciences. Volgograd, 2014. 144 p. (rus)

22. Bazhenov Yu.M. New century – new concretes [Novomu veku – novye betony]. *Stroitelnye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka*. 2000. No. 2. Pp. 10–11. (rus)

23. Judowitsch B.E., Dmitriyew A.M., Subechin S.A. et al. Das Zement der niedrigen Wasserbedarf – das zusammenziehende Stoff der neuen Generation. *Nauka i Technika (Wissenschaft und Technik)*. 1994. Pp. 15–18.

24. Judowitsch B.E., Dmitriyew A.M., Subechin S.A. et al. Zemente des niedrigen Wasserbedarfs – Zusammenziehende Stoffe der neuen Generation. *Zement und seine Verwendung*. 1999. No. 4. Pp. 15–18.

25. Trunov P.V., Alfimova N.I., Vishnevskaya Ya.Yu., Evtushenko E.I. Influence of the grinding method on the energy intensity of production and quality characteristics of composite binders [Vliyanie sposoba pomola na energoemkost izgotovleniya i kachestvennye kharakteristiki kompozitsionnykh vyazhushchikh]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2012. No. 4. Pp. 37–39. (rus)

26. Shkarin A.V., Zagorodnyuk L.Kh., Shchekina A.Yu., Luginina I.G. Production of composite binders in various grinding units [Poluchenie kompozitsionnykh vyazhushchikh v razlichnykh pomolnykh agregatakh]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* 2012. No. 9. Pp. 89–92. (rus)

27. Lesovik R.V. Fine-grained concretes based on composite binders of technogenic sands [Melkozernistye betony na osnove kompozitsionnykh vyazhushchikh tekhnogennykh peskov]: monograph. Belgorod: Publishing house of BSTU, 2013. 567 p. (rus)

28. Sobolev E.S., Sidorov V.V. Interaction of the pile and the surrounding soil during vibratory driving [Vzaimodeystvie svai i okruzhayushchego

grunta pri vibratsionnom pogruzhении]. Vestnik MGSU. 2018. No. 3 (114). Pp. 293–300. (rus)

29. Baidzhanov D.O., Abdrakhmanova K.A. Influence of additives and fillers on the properties of concrete for piles operating in water-saturated soils [Vliyanie dobavok i napolniteley na svoystva betona dlya svay rabotayushchikh v vodonasyshchennykh gruntakh]. Trudy Karagandinskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2019. No. 2(75). Pp. 72–75. (rus)

30. Vshivkov A.S., Bochkareva T.M. The use of composite materials in the technology of device of bored piles in casing pipes [Primenenie kompozitnykh materialov v tekhnologii ustroystva buronabivnykh svay v obsadnykh trubakh]. Vestnik PNI-PU. Stroitelstvo i arkhitektura. 2016. No. 2. Pp. 69–74. (rus)

31. Ter-Martirosyan A.Z., Le D.A., Manukyan A.V. Influence of soil liquefaction on the design bearing capacity of the pile [Vliyanie razzhizheniya gruntov na raschetnyuyu nesushchuyu sposobnost svai]. Vestnik MGSU. 2020. No. 5. Pp. 655–664. (rus)

32. Gotman A.L. Experimental studies of the work of combined pile foundations under horizontal load [Eksperimentalnye issledovaniya raboty kombinirovannykh svaynykh fundamentov na deystvie gorizontальной nagruzki]. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 2014. No. 3. Pp. 2–6. (rus)

33. Khristalev L.N., Emelyanova L.V. Forecast of the stability of the pile foundation based on the results of temperature observations in a well located next to the foundation [Prognoz ustoychivosti svaynogo fundamenta po rezultatam temperaturnykh nablyudeniy v raspolozhennoy ryadom s fundamentom skvazhine]. Kriosfera Zemli. 2025. Vol. 29. No. 1. Pp. 66–73. (rus)

34. Tang J. Application of Cast-in-Place Piles and Prefabricated Piles in Road and Bridge Foundation Construction. China Kitchen & Bathroom. 2021. No. 9. Pp. 55–56.

35. Startseva S.S., Putina Yu.A. The use of screw pile foundations in modern construction [Primenenie vintovykh svaynykh fundamentov v sovremennom stroitelstve]. Molodezh i nauka: materialy XX mezhdunar. nauch.-prakt. konf. starshklassnikov, studentov i aspirantov: v 2 t. Nizhniy Tagil: Ural-skiy federalnyy universitet, 2024. Pp. 165–167. (rus)

36. Sergienko A.V. Pile foundations: new technologies and designs [Svaynye fundamenty: novye tekhnologii i konstruktii]. Fundamenty. 2023. No. 4(14). Pp. 52–54. (rus)

37. Zhang W. Comparative Analysis of Settlement Calculations for Pile Foundations Based on American and Chinese Standards. Comprehensive Utilization of Fly Ash. 2022. No. 3. Pp. 1–10. DOI: 10.58339.

Information about the authors

Gubarev, Sergey A. Postgraduate student. E-mail: gubarev.sereja@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Zagorodnyuk, Liliya Kh. DSc, Professor E-mail: lhz47@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Ageeva, Marina S. PhD. E-mail: ageevams@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Chernukha, Danil G. Postgraduate student. E-mail: cherrykursk@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Zhang Xuan Postgraduate student. E-mail: 532339133@qq.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 11.09.2025

Для цитирования:

Губарев С.А., Загороднюк Л.Х., Агеева М.С., Чернуха Д.Г., Чжан Сюань Вяжущие композиции для мелкозернистых бетонов в свайных фундаментах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 11. С. 36–47. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-36-47

For citation:

Gubarev S.A., Zagorodnyuk L.Kh., Ageeva M.S., Chernukha D.G., Zhang Xuan Binding compositions for fine-grained concrete in pile foundations. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 11. Pp. 36–47. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-36-47