

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-6-25-37

***Чернуха Д.Г., Загороднюк Л.Х., Иванов Г.В.**

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

*E-mail: callipso71@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ МЕХАНОАКТИВАЦИИ В ВИБРАЦИОННОЙ МЕЛЬНИЦЕ НА СВОЙСТВА ВЯЖУЩИХ КОМПОЗИЦИЙ С ДОБАВЛЕНИЕМ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПЕСКА

Аннотация. В работе исследованы вяжущие композиции на основе портландцемента и вулканического песка, подвергнутые механоактивации в вибрационной мельнице. Определены рациональные параметры помола (10, 30 и 50 минут) и содержание наполнителя (10–30 %). Установлено, что при оптимальных режимах удельная поверхность достигает 731,2 м²/кг, а прочность при сжатии через 28 суток увеличивается до 90,34 МПа, что на 77,8 % выше показателя товарного цемента. Методами лазерной гранулометрии и рентгенофазового анализа выявлены механизмы упрочнения, связанные с аморфизацией структуры, уменьшением среднего диаметра частиц и образованием дополнительных гидросиликатных фаз. Показана возможность экономии портландцемента до 30 % без потери прочностных характеристик. Механоактивация способствует более полному протеканию гидратации, что подтверждается увеличением содержания низкоосновных гидросиликатов кальция. Полученные композиты рекомендуются для изготовления высокопрочных бетонов, дорожных покрытий и малоэтажного строительства, а также для производства мелкоштучных изделий (тротуарной плитки, стеновых блоков) и конструкций. Дальнейшие исследования направлены на оценку морозостойкости и долговечности в агрессивных средах. Экономический эффект достигается за счёт замены части клинкера природным сырьём при сохранении высоких эксплуатационных свойств материала.

Ключевые слова: механоактивация, вибрационная мельница, вулканический песок, вяжущие композиции, удельная поверхность, прочность при сжатии, гранулометрический состав, рентгенофазовый анализ.

Введение. Современное строительство характеризуется постоянно возрастающими требованиями к эксплуатационным характеристикам строительных материалов, в частности к их прочности, долговечности и экономической эффективности. Одним из ключевых направлений развития строительного материаловедения является разработка и внедрение композиционных вяжущих веществ [1–5], позволяющих снизить расход традиционного портландцемента без потери качества конечных изделий. Портландцемент [6–11], являясь основным компонентом большинства бетонов и растворов, имеет высокую себестоимость и значительный углеродный след, что стимулирует поиск альтернативных решений.

В качестве минеральных добавок [12–14] широко применяются различные тонкодисперсные наполнители природного и техногенного происхождения. Они позволяют не только экономить клинкерную часть, но и активно влиять на процессы гидратации и структурообразования цементного камня. Особый интерес представляют вулканические породы [15–16], которые благодаря своему аморфному или скрытокристаллическому строению, содержанию активного кремнезема и алюминатов способны вступать в реакции с гидроксидом кальция, выделяющимся при гидратации цемента, с

образованием дополнительных гидросиликатных фаз. Однако низкая реакционная способность природных вулканических песков в исходном состоянии ограничивает их применение. Решение этой проблемы видится в механической активации.

Механоактивация [17–19] в высокоэнергетических мельницах, в частности, вибрационного типа, позволяет значительно увеличить удельную поверхность частиц, создать дефекты кристаллической решетки, частично аморфизовать структуру минералов и тем самым повысить их химическую активность. В литературе имеются данные об успешном использовании вибрационных мельниц [20–22] для активации цементных систем с различными наполнителями, однако, влияние режимов помола (продолжительности) и дозировки вулканического песка на комплекс свойств композиционных вяжущих изучено недостаточно.

Материалы и методы. В качестве исходных материалов использовали портландцемент (товарный, удельная поверхность 300 м²/кг, прочность при сжатии 50,8 МПа) и вулканический песок Халактырского пляжа Камчатского края фракциями менее 5 мм. Приготовление композитов осуществляли в вибрационной мельнице. Варьировали время помола

(10, 30 и 50 минут) и введение различных дозировок песка (10, 20, 30 % от массы смеси). Определение удельной поверхности проводили в соответствии с ГОСТ 310.2-76. Гранулометрический состав изучали на лазерном анализаторе Analysette 22 NanoTec plus. Сроки схватывания оценивали по ГОСТ 310.3-76, прочность при

сжатии – по ГОСТ 310.4-81. Минеральный состав гидратированных образцов анализировали методом рентгенофазового анализа.

Для установления особенностей влияния вулканического песка и его рациональной дозировки в качестве минерального наполнителя в рассматриваемых вяжущих композициях изучали составы, приведенные в таблице 1.

Таблица 1

Составы на основе портландцемента и вулканического песка, полученные механоактивацией в вибрационной мельнице

№ составов	Состав, %		НГ, %	Сроки схватывания, мин		R _{сж} , МПа, в возрасте 28 сут	S, м²/кг
	Цемент	Песок вулканиче- ский					
				начало	конец		
исходный товарный цемент						50,8	300
продолжительность помола - 10 мин							
1ВВ	90	10	28,9	110	141	85,97	559,8
2ВВ	80	20	29,5	114	147	80,09	549,5
3ВВ	70	30	30,1	117	149	78,32	544,0
продолжительность помола - 30 мин							
4ВВ	90	10	30,2	123	152	85,56	731,2
5ВВ	80	20	30,5	128	157	90,34	712,7
6ВВ	70	30	30,9	132	161	62,79	620,8
продолжительность помола - 50 мин							
7ВВ	90	10	31,1	130	163	75,77	611,8
8ВВ	80	20	30,5	133	167	63,94	576,9
9ВВ	70	30	30,7	138	171	53,16	538,5

Основная часть. Проведённые экспериментальные исследования показали, что механоактивация в вибрационной мельнице приводит к значительному увеличению удельной поверхности всех вяжущих композиций (рис. 1) по сравнению с товарным цементом, который имеет показатель 300 м²/кг. Для каждого из девяти составов были получены значения удельной поверхности, анализ которых позволяет выявить чёткие закономерности.

Для составов первой группы (1BV, 2BV, 3BV), подвергнутых механоактивации в течение 10 минут, удельная поверхность изменяется в интервале от 544,0 до 559,8 м²/кг. При этом разброс значений составляет всего 2,9 %, что свидетельствует о незначительном влиянии дозировки песка на эффективность измельчения на начальном этапе.

При увеличении времени помола до 30 минут (составы 4BV, 5BV, 6BV) наблюдается дальнейший рост удельной поверхности. Наибольшее значение зафиксировано для состава 4BV (90 % цемента + 10 % песка) – 731,2 м²/кг, что в 2,44 раза выше контроля. Состав 5BV (80 % цемента + 20 % песка) показал значение 712,7 м²/кг, а состав 6BV (70 % цемента + 30 % песка) – 620,8 м²/кг. Отмечается закономерное

снижение удельной поверхности при увеличении доли вулканического песка. Данный эффект может объясняться тем, что частицы песка выполняют роль демпферов, снижая эффективность ударов мелющих тел по цементным зёрнам, кроме того отмечается также быстрое покрытие их тонким слоем измельчённого цемента, что препятствует их дальнейшему разрушению.

Дальнейшее увеличение продолжительности помола до 50 минут (составы 7BV, 8BV, 9BV) приводит к некоторому снижению удельной поверхности: от 611,8 м²/кг для состава 7BV до 538,5 м²/кг для состава 9BV. Этот эффект может быть обусловлен процессами агрегации сверхтонких частиц, накоплением поверхностного заряда, а также возможной аморфизацией поверхности, при которой традиционный метод воздухопроницаемости даёт заниженные результаты из-за изменения формы и пористости частиц.

Общий разброс значений удельной поверхности по всем девяти составам составляет 34,0 %, что подтверждает значительное влияние как продолжительности помола, так и содержания наполнителя на эффективность механоактивации.

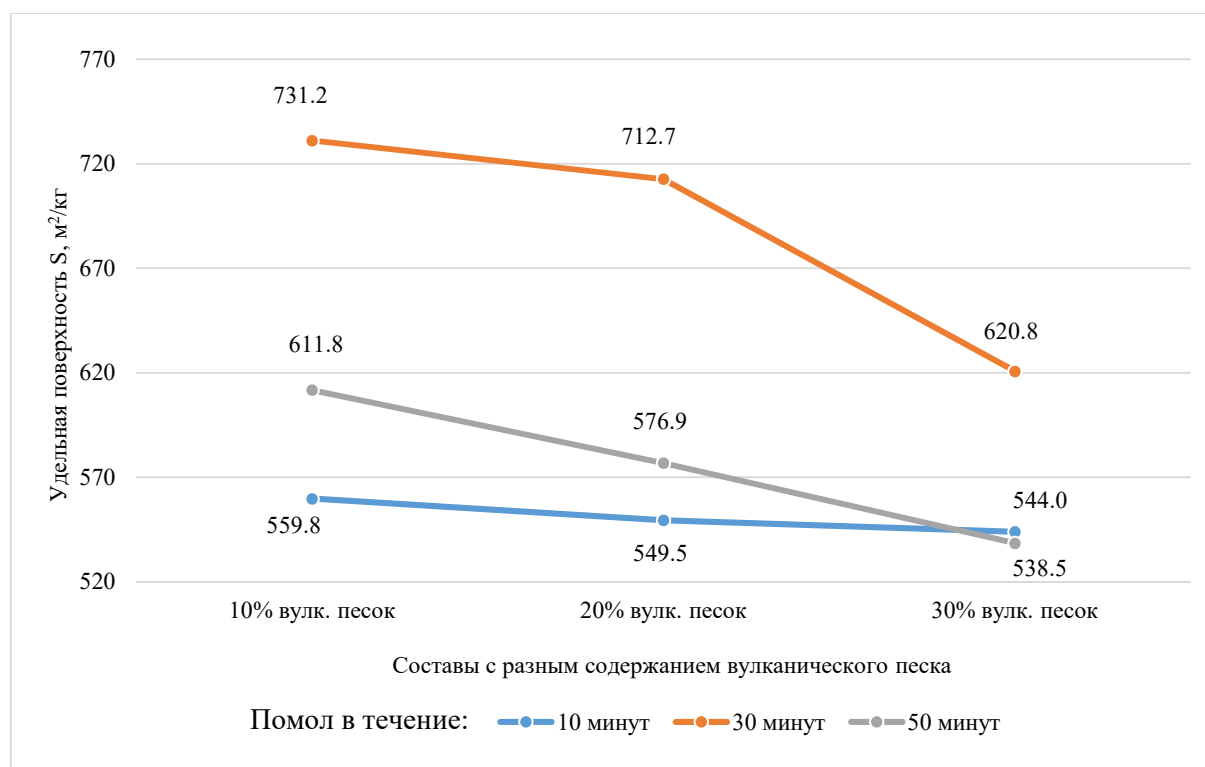


Рис. 1. Изменение удельной поверхности составов 1ВВ-9ВВ при помоле составов с различным соотношением цемента и вулканического песка и при различной продолжительности помола

Прочность при сжатии образцов, изготовленных из полученных вяжущих композиций, определяли после 28 суток твердения в нормальных условиях. Результаты испытаний в сопоставлении с исходным товарным цементом (50,8 МПа) представлены в (табл. 1).

Для составов, активированных в течение 10 минут (1ВВ-3ВВ), установлено следующее. Состав 1ВВ (90 % цемента + 10 % песка) достиг прочности 85,97 МПа, что превышает контроль на 69,2 %. Состав 2ВВ (80 % цемента + 20 % песка) показал прочность 80,09 МПа (превышение 57,6 %). Состав 3ВВ (70 % цемента + 30 % песка) – 78,32 МПа (превышение 54,2 %). Таким образом, уже при 10-минутной активации все составы значительно превосходят товарный цемент, причём, наиболее эффективным является введение 10 % песка.

При 30-минутной активации (составы 4ВВ-6ВВ) наблюдаются следующие значения. Состав 4ВВ (10 % песка) – 85,56 МПа (превышение 68,4 %). Состав 5ВВ (20 % песка) – 90,34 МПа (превышение 77,8 %). Состав 6ВВ (30 % песка) – 62,79 МПа (превышение 23,6 %). Наилучший результат достигнут для состава 5ВВ, который может быть рекомендован в качестве оптимального по прочности.

При 50-минутной активации (составы 7ВВ-9ВВ) прочность снижается по сравнению с 30-минутной обработкой. Это, на первый взгляд, противоречит ожидаемому эффекту механоактивации: логично предположить, что накопление

дефектов в структуре клинкерных минералов должно повышать реакционную способность и, как следствие, прочностные показатели вяжущей композиции. Однако, в данном случае снижение прочности при переизмельчении объясняется возможной агрегацией частиц, нарушением оптимального гранулометрического состава и накоплением избыточных дефектов, не компенсируемых положительным эффектом активации. Таким образом, наилучшие прочностные показатели демонстрируют составы 1ВВ и 5ВВ, которые в дальнейшем были выбраны для более детального структурного анализа.

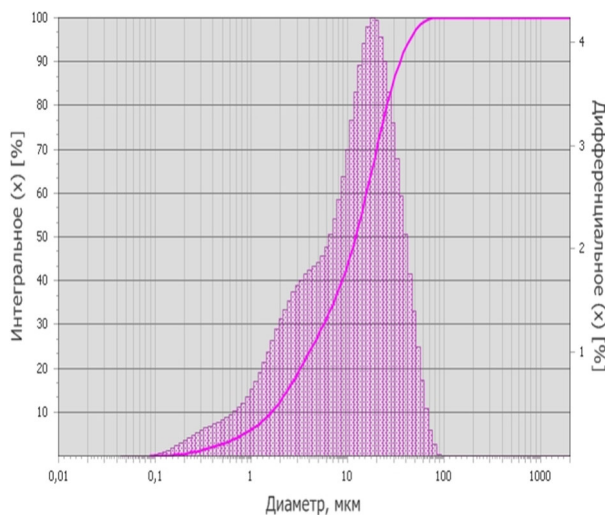
Для углублённого понимания механизмов, определяющих рост прочности, были проведены гранулометрические исследования методом лазерной дифракции на анализаторе Analysette 22 NanoTec plus. Изучались составы 1ВВ и 4ВВ (90 % цемента + 10 % песка, активация 10 и 30 минут соответственно), а также составы 3ВВ и 6ВВ (70 % цемента + 30 % песка, активация 10 и 30 минут).

Для пары составов 1ВВ и 4ВВ (рис. 2) установлено следующее. Состав 1ВВ (10 минут помола) характеризуется диапазоном размеров зёрен 2,48...2,88, частицы имеют размеры от 0,1 до 100 мкм, удельная поверхность в объёмных единицах составляет 17465 см²/см³. Состав 4ВВ (30 минут помола) имеет диапазон размера зёрен 2,42...2,75 (снижение, что указывает на некоторое снижение эффективности дальнейшего из-

мельчения), частицы также укладываются в диапазон 0,1-100 мкм, однако удельная поверхность возрастает до $19640 \text{ см}^2/\text{см}^3$, что даёт прирост 12,5 %. Средний диаметр частиц уменьшается с

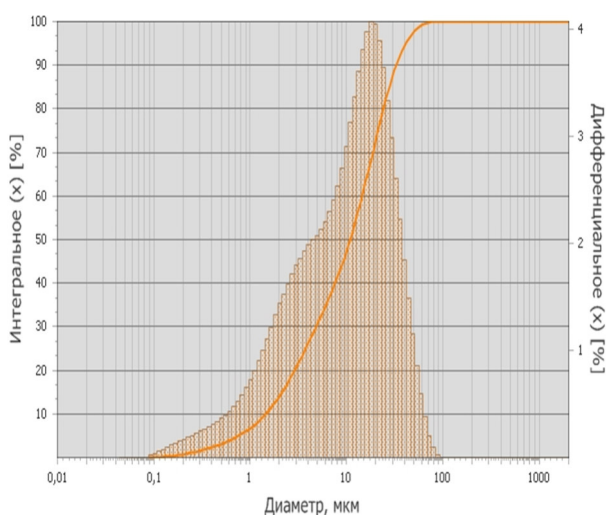
15,5 до 14,5 мкм (снижение на 7 %). Эти изменения чётко коррелируют с увеличением удельной поверхности, измеренной стандартным методом, и будут влиять на процессы структурообразования при гидратации.

а)



1ВВ

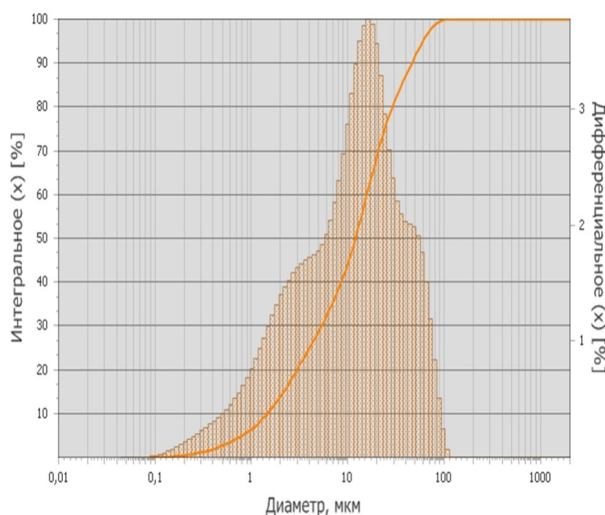
б)



4ВВ

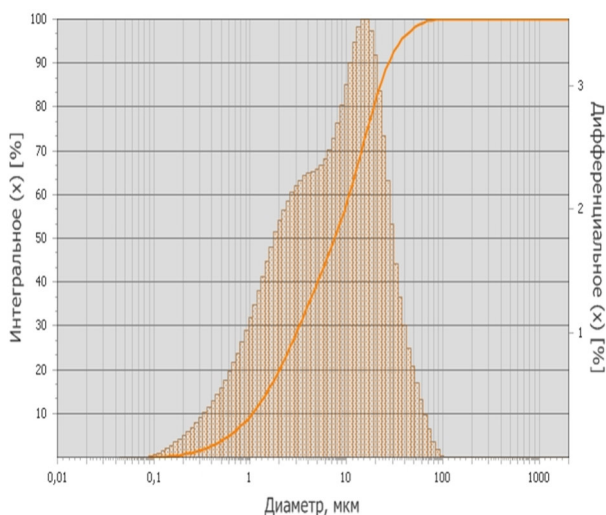
Рис. 2. Результаты гранулометрических исследований вяжущих композиций составов 90% портландцемент + 10% вулканический песок: (а) 1ВВ – механоактивация в течение 10 минут; (б) 4ВВ – механоактивация в течение 30 минут

а)



3ВВ

б)



6ВВ

Рис. 3. Результаты гранулометрических исследований вяжущих композиций составов 70% портландцемент + 30% вулканический песок: (а) 3ВВ – механоактивация в течение 10 минут; (б) 6ВВ – механоактивация в течение 30 минут

Для пары составов 3ВВ и 6ВВ (70 % цемента + 30 % песка) (рис. 3) изменения более выражены. Состав 3ВВ (10 минут помола) имеет диа-

пазон размера зёрен 3,40...3,73, частицы размером от 0,1 до 100 мкм, удельная поверхность $17766 \text{ см}^2/\text{см}^3$. Состав 6ВВ (30 минут помола) характеризуется снижением диапазона до

3,11...3,47, распределение частиц в том же диапазоне 0,1-100 мкм, но удельная поверхность возрастает до 23912 см²/см³, что даёт прирост около 35 %. Средний диаметр частиц уменьша-

ется с 18,0 до 11,6 мкм (снижение на 35,6 %). Такое значительное изменение гранулометрического состава объясняет рост прочности и согласуется с результатами измерений удельной поверхности.

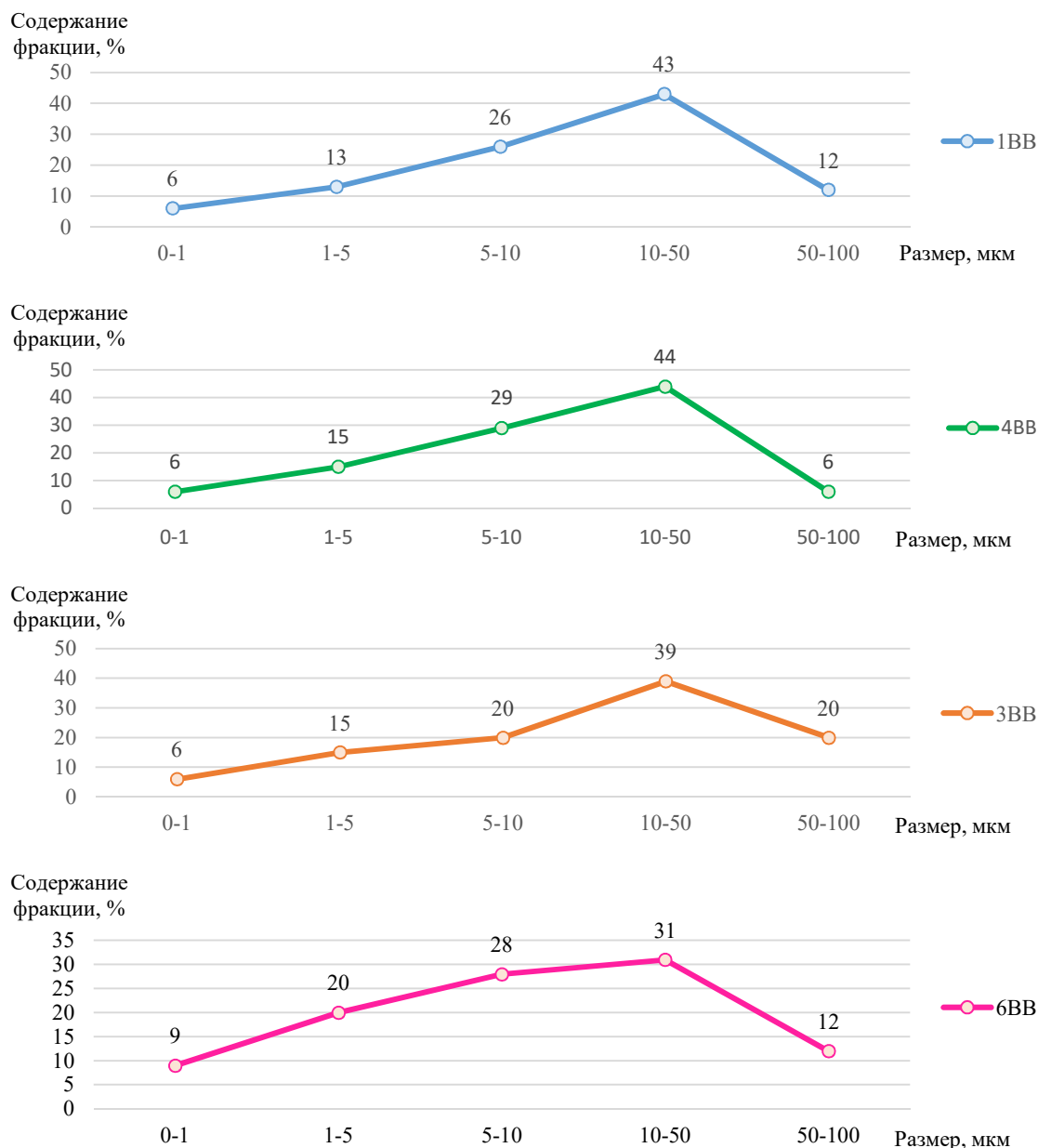


Рис. 4. Процентное соотношение различных фракций вяжущих композиций в составах 1BV-6BV, механоактивированных в вибрационной мельнице

Анализ фракционного состава (рис. 4) показывает, что составы 1BV и 3BV, активированные 10 минут, имеют повышенное содержание фракций 10-50 мкм (43 % и 39 % соответственно), а также значительную долю фракций 50-100 мкм (12 % и 20 %). При увеличении времени помола до 30 минут (составы 4BV и 6BV) доля крупных фракций снижается, структура становится более однородной, что подтверждает высокую эффективность механоактивации в вибрационной мельнице.

Сроки начала и конца схватывания определяли по ГОСТ 310.3-76. Полученные результаты для всех девяти составов представлены на (рис. 5). Установлено, что все показатели демонстрируют стабильный, плавно возрастающий характер при увеличении как содержания вулканического песка, так и продолжительности механоактивации.

Для составов 1BV и 3BV (10 минут помола) начало схватывания увеличивается с 110 до 117 минут (прирост 6,3 %), конец схватывания – с 141 до 149 минут (прирост 5,7 %). Для составов

4ВВ и 6ВВ (30 минут помола) начало схватывания возрастает с 123 до 132 минут (7,3 %), конец схватывания – с 152 до 161 минуты (5,9 %). Для составов 7ВВ и 9ВВ (50 минут помола) начало схватывания увеличивается с 130 до 138 минут (6,2 %), конец схватывания – с 163 до 171 минуты (4,9 %).

Полученные результаты согласуются с теоретическими представлениями о влиянии тонко-

дисперсных минеральных наполнителей на процессы гидратации: увеличение удельной поверхности и содержания активного кремнезёма приводит к более равномерному распределению воды и некоторому замедлению начальных реакций, однако, все значения остаются в пределах нормативных требований.

Обобщённые результаты прочности при сжатии для всех девяти составов представлены на гистограмме (рис. 6).

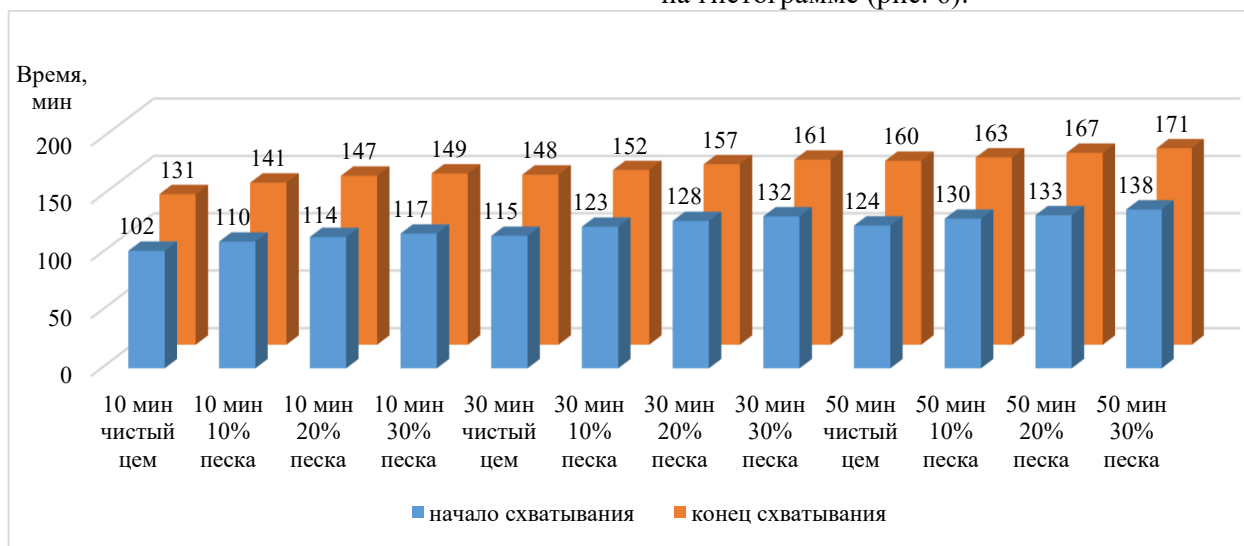


Рис. 5. Сроки начала и конца схватывания составов 1ВВ-9ВВ

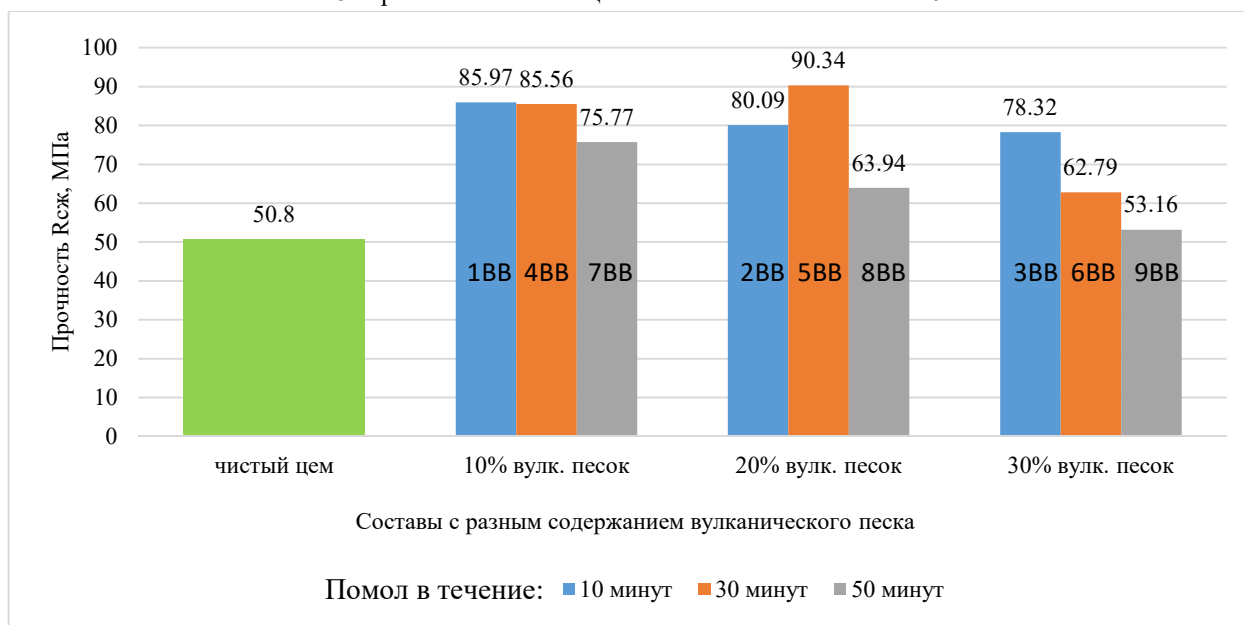


Рис. 6. Гистограмма прочностных показателей при сжатии образцов составов 1ВВ-9ВВ с различным содержанием цемента и вулканического песка

Как уже отмечалось, наилучшие показатели зафиксированы для состава 1ВВ (85,97 МПа) и состава 5ВВ (90,34 МПа). Составы, активированные в течение 50 минут (7ВВ-9ВВ), демонстрируют значительно более низкую прочность, чем образцы с 10- и 30-минутной активацией. Поэтому в дальнейших исследованиях фазового состава рассматривались только

составы 1ВВ, 4ВВ, 3ВВ и 6ВВ, а также дополнительно состав 5ВВ, как абсолютный лидер по прочности.

С целью выявления фазового состава и механизмов упрочнения был проведён рентгенофазовый анализ образцов составов 1ВВ, 4ВВ, 3ВВ и 6ВВ после 28 суток гидратации.

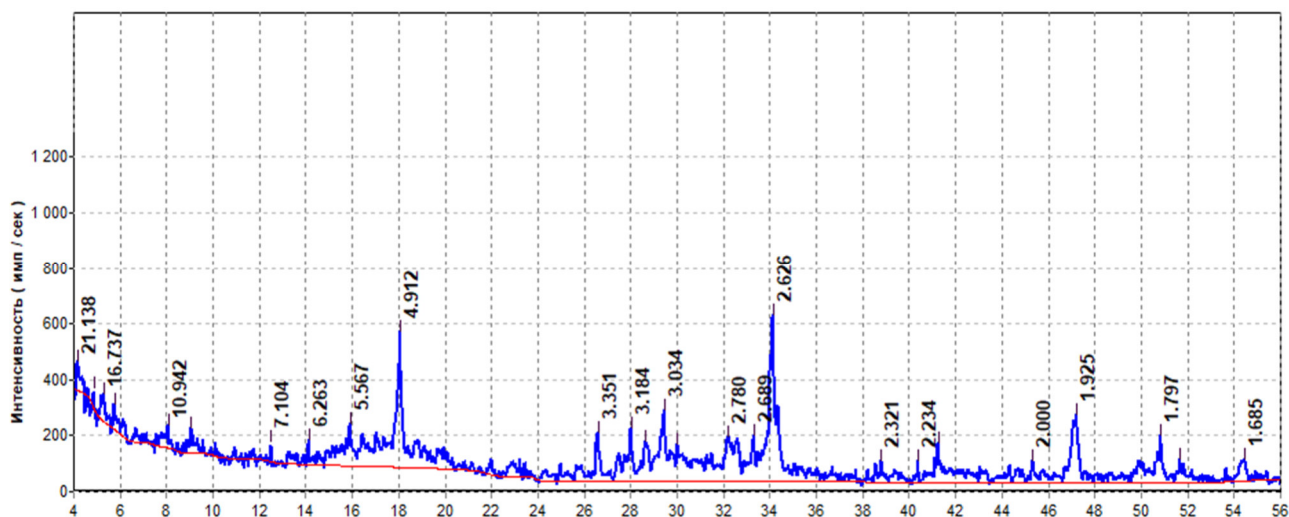


Рис. 7. Дифрактограмма гидратированной вяжущей композиции состава 1ВВ (цемент-90%+вулканический песок 10%), механоактивированной в течение 10 мин в вибрационной мельнице

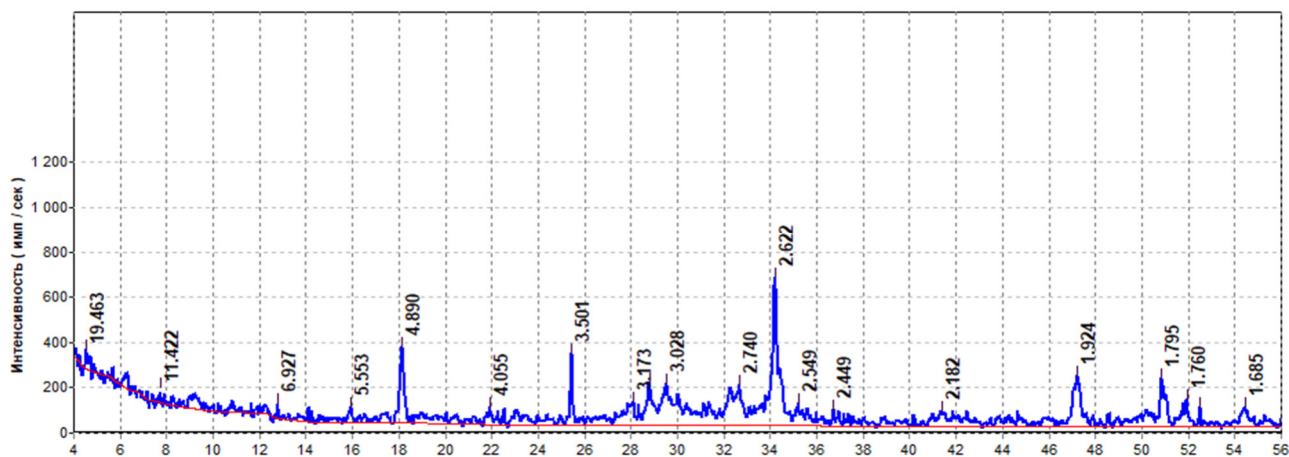


Рис. 8. Дифрактограмма гидратированной вяжущей композиции состава 4ВВ (цемент-90%+вулканический песок 10%), механоактивированной в течение 30 мин в вибрационной мельнице

Анализ дифрактограмм составов 1ВВ и 4ВВ (рис. 7 и рис. 8) показал присутствие следующих гидратированных фаз портландцементного клинкера и продуктов взаимодействия с вулканическим песком: С-S-H (II) с межплоскостными расстояниями $d=9,8; 4,9; 3,07; 2,8; 2,00; 1,83$ Å; портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d=4,93; 3,11; 2,63; 1,93; 1,79; 1,69$ Å); β - SiO_2 ($d=4,26; 3,34; 2,45; 2,28; 2,23; 2,12; 1,975; 1,812; 1,668$ Å); андезин ($d=4,04; 3,21; 3,18$ Å); анортит ($d=4,05; 3,21; 3,19$ Å); авгит ($d=1,41; 1,32; 1,07$ Å); энстатит ($d=3,16; 2,95; 2,86; 2,7; 2,52; 2,47; 2,11; 1,96$ Å); α -кристобалит ($d=4,15; 2,92; 2,53; 2,17; 2,07; 1,99$ Å).

Сопоставление результатов РФА с прочностными показателями позволяет сделать следующие выводы. Состав 1ВВ (10 минут помола) характеризуется высокой степенью аморфизации, в аморфизированной массе присутствуют частицы различной величины, что создаёт микроаркас для формирования цементного камня.

Интенсивность дифракционных максимумов, соответствующих $\text{Ca}(\text{OH})_2$, снижена, а содержание гидросиликатов кальция увеличено по сравнению с товарным цементом. Это свидетельствует о высокой активности системы и объясняет рост прочности до 85,97 МПа. При увеличении времени помола до 30 минут (состав 4ВВ) прочность остаётся на высоком уровне (85,56 МПа), что говорит о допустимости активации в интервале 10-30 минут для данного состава.

Для составов 3ВВ и 6ВВ (рис. 9 и рис. 10) набор идентифицированных фаз аналогичен. Состав 3ВВ (10 минут помола, 30 % песка) также характеризуется высокой аморфизацией и снижением интенсивности пиков портландита, что обеспечивает прочность 78,32 МПа. Однако, при увеличении времени помола до 30 минут (состав 6ВВ) прочность снижается до 62,79 МПа, что связано с переизмельчением и нарушением оптимальной структуры.

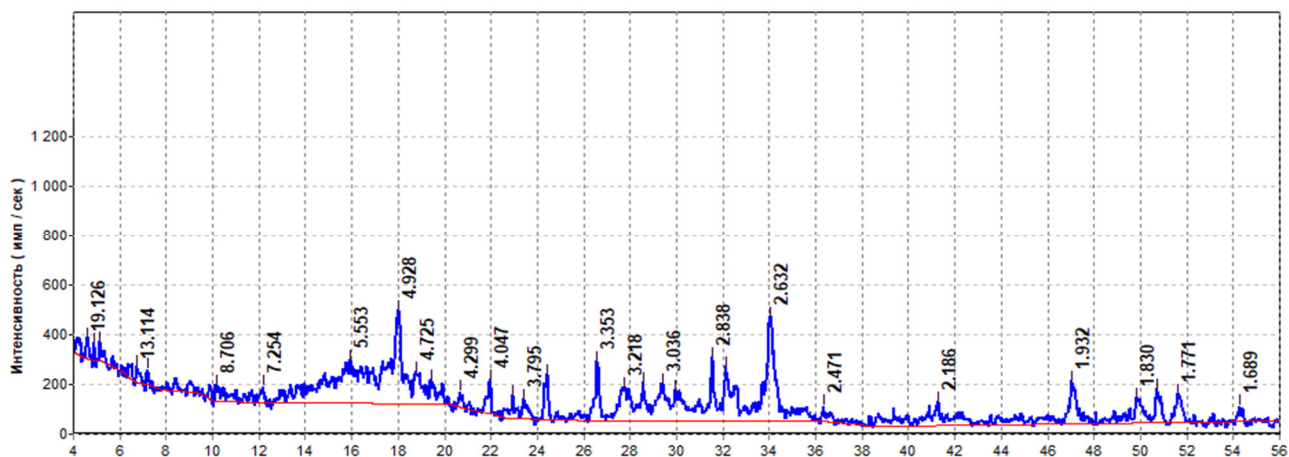


Рис. 9. Дифрактограмма гидратированной вяжущей композиции состава 3ВВ (цемент-70%+вулканический песок 30%), механоактивированной в течение 10 мин в вибрационной мельнице

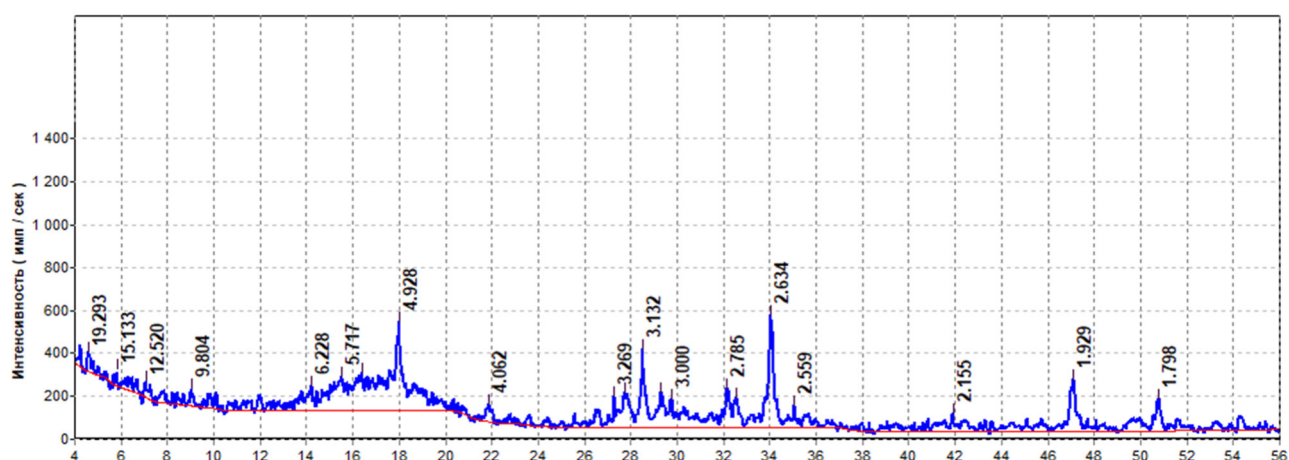


Рис. 10. Дифрактограмма гидратированной вяжущей композиции состава 6ВВ (цемент-70 %+вулканический песок 30 %), механоактивированной в течение 30 мин в вибрационной мельнице

Сравнение интенсивностей дифракционных отражений (табл. 2) показывает, что при увеличении времени помола с 10 до 30 минут (состав 4ВВ) происходит более интенсивная аморфизация структуры. Для большинства фаз наблюдается снижение интенсивности пиков, что свидетельствует о частичной дефектности кристаллической решётки и переходе материала в рентгеноаморфное состояние. Наибольшее снижение отмечено для $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d=4,93 \text{ \AA}$), CSH(II) ($d=3,07 \text{ \AA}$) и $\beta\text{-SiO}_2$ ($d=3,34 \text{ \AA}$), что указывает на активное взаимодействие этих компонентов с вулканическим песком при более тонком помоле. Фазы андезина, анортита и энстатита сохраняют умеренную интенсивность, выполняя роль микрозернистых наполнителей и центров кристаллизации.

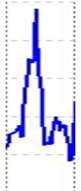
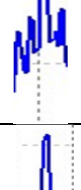
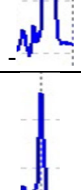
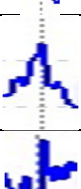
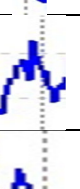
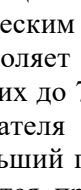
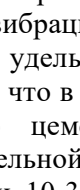
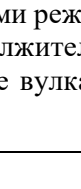
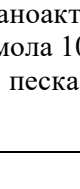
Таким образом, рентгенофазовые исследования подтверждают, что ключевыми факторами повышения прочности являются: аморфизация структуры, снижение содержания свободного портландита, увеличение доли гидросиликатов кальция и формирование плотной зонированной структуры цементного камня.

Таблица 2

Интенсивность дифракционных отражений $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CSH(II) , гидрولита, эттрингита, $\beta\text{-SiO}_2$, андезина, анортита, энстатита, α -кристобалита в составах 1ВВ и 4ВВ вяжущих композиций с вулканическим песком в возрасте 28 суток

Фрагмент дифрактограммы	Составы	
	90 % ПЦ / 10 % вулк. песок	
	1ВВ (10 мин помол)	4ВВ (30 мин помол)
1	2	3
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ $d=4,93 \text{ \AA}$		

Продолжение табл. 2

1	2	3
CSH(II) d=3,07Å		
Гиролит d=2,85Å		
Эттрингит d=9,73Å		
β -SiO ₂ d=3,34Å		
Андезин d=3,18Å		
Анортит d=4,05Å		
Энстатит d=2,105Å		
α -кристобалит d=4,15Å		

Выводы. На основании исследований можно сделать следующие выводы:

1. Механоактивация композиций портланд-цемента с вулканическим песком в вибрационной мельнице позволяет увеличить удельную поверхность вяжущих до 731,2 м²/кг, что в 2,44 раза выше показателя товарного цемента (300 м²/кг). Наибольший прирост удельной поверхности достигается при введении 10-30 % песка и времени помола 10–30 минут.

2. Оптимальными режимами механоактивации являются продолжительность помола 10–30 минут и содержание вулканического песка 10–

20 %. Наибольшая прочность при сжатии в возрасте 28 суток (90,34 МПа) достигнута для состава 5ВВ (80 % цемента + 20 % песка, 30 минут помола), что на 77,8 % выше контроля.

3. Введение до 30 % вулканического песка при 10-минутной механоактивации обеспечивает превышение прочности товарного цемента на 54–69 %, что даёт возможность экономить до 30 % портландцемента без снижения эксплуатационных характеристик.

4. Лазерная гранулометрия показала, что увеличение времени помола с 10 до 30 минут приводит к уменьшению среднего диаметра частиц на 7–35 % и повышению однородности структуры за счёт снижения доли крупных фракций (50–100 мкм). Наиболее выраженный эффект отмечен для составов с 30 % песка.

5. Рентгенофазовый анализ выявил в гидратированных образцах фазы CSH(II), портландит, β -SiO₂, андезин, анортит, энстатит, α -кристобалит, гиролит и эттрингит. Установлено, что при оптимальных режимах активации снижается интенсивность пиков Ca(OH)₂ и β -SiO₂, усиливается аморфизация и увеличивается содержание гидросиликатов кальция, что является основой повышения прочности.

6. Увеличение времени помола до 50 минут нецелесообразно из-за снижения прочности (до 53,16–75,77 МПа) и ухудшения структурной однородности, связанных с переизмельчением и возможной агрегацией частиц.

Рекомендации для дальнейшей работы.

Учитывая снижение прочности при помоле 50 минут, для перспективных исследований рекомендованы составы, активированные в течение 10 и 30 минут, особенно 1ВВ и 5ВВ, как показавшие наилучшее сочетание прочности и удельной поверхности. Использование вулканического песка в качестве минерального наполнителя признано эффективным и целесообразным.

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., Кардумян 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., Бодман 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. Гришина А.Н. Композиционные вяжущие для строительных растворов специального назначения // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2024. № 1(74). С. 25–34.
6. Mukhamedbaeva Z., Eshmuratova R., Aliyeva R., Karimov M. Sulfate-resistant cement modified with waste from a mining and processing plant // Universum: технические науки. 2024. No. 11-12(128). Pp. 26–31. DOI: 10.32743/UniTech. 2024.128.11.18625.
7. Романенко И.И., Фадин А.И., Петровнина И.Н. Композиционное вяжущее для производства железобетонных изделий в заводских условиях // Региональная архитектура и строительство. 2024. № 3(60). С. 26–31. DOI: 10.54734/20722958_2024_3_26.
8. Чернышов С.А., Дребот А.М. Цементная отрасль: история возникновения и развития // Инициативы молодых - науке и производству: сборник статей VII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2024. С. 76–80.
9. Соколова С.В. Модификация бетонов специального назначения путем структурной модификации // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2025. № 42. С. 25–28.
10. Тхет Н.М., Кривобородов Ю.Р., Хтет П.А. Композиционные цементы с повышенной коррозионной стойкостью // Бутлеровские сообщения. 2025. Т. 83, № 9. С. 47–55. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-83-9-47.
11. Пшеничный Г.Н. О твердении портландцемента и не только... Часть 1. Твердение строительного гипса // Технологии бетонов. 2025. № 4(201). С. 71–75.
12. Капленко О.А., Сигитова И.С. Влияние активных минеральных добавок на свойства цемента и бетона // Университетская наука. 2016. № 2(2). С. 36–38.
13. Ковальченко О.В., Алфимова Н.И. К вопросу о применении продуктов вулканической деятельности в строительном материаловедении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 6. С. 24–28. DOI: 10.12737/article_5926a0593fffb1.48828859.
14. Лесовик В.С., Гончаров Р.Ю., Богун Н.В. Опыт и перспективы применения минеральных наполнителей для бетонов // Университетская наука. 2025. № 1(19). С. 55–57.
15. Куликова Е.С., Кривун Е.А. Минерально-сырьевые ресурсы Камчатского края и их использование в строительном комплексе // Технические науки — от теории к практике. 2016. № 57. С. 150–154.
16. Чернуха Д.Г., Иванов Г.В., Сорокин М.А. Бетоны с использованием Халактырского вулканического песка: инженерно-геологические особенности, свойства и перспективы применения // Современные бетоны и технологии: проблемы, решения, перспективы: Материалы III Международной научно-практической конференции. Краснодар: ООО "Издательский Дом-Юг", 2025. С. 83–87.
17. Алфимова Н.И., Калатоzi В.В., Карацупа С.В., и др. Механоактивация как способ повышения эффективности использования сырья различного генезиса в строительном материаловедении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 85–89.
18. Нелюбова В.В., Рыкунов А.М., Бондаренко А.И. Механоактивация — эффективный способ совершенствования сухих строительных смесей // Инновации и моделирование в строительном материаловедении: сборник научных трудов. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2017. С. 65–69.
19. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лесовик В.С. Современные способы активации вяжущего и бетонных смесей (обзор) // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2018. № 4(37). С. 85–99. DOI: 10.5281/zenodo.2008670.
20. Пудова Р.М. Исследование динамики измельчения песка вибрационной мельницей // Студенческая наука и XXI век. 2020. Т. 17, № 2-1(20). С. 87–89.
21. Богданов В.С., Анциферов С.И., Богданов Н.Э., Нижегородов А.И., Сычѳв Е.А. Зависимость производительности вибрационной мельницы от её конструктивных и технологических параметров // Цемент и его применение. 2023. № 3. С. 46–49.
22. Богданов В.С., Анциферов С.И., Богданов Н.Э., Воронов В.П., Сычѳв Е.А. Кинетика процесса измельчения материала в вибрационной мельнице // СТИН. 2023. № 8. С. 5–7.

Информация об авторах

Чернуха Данил Григорьевич, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: cherykursk@mail.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.

Иванов Георгий Владимирович, студент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: ivanov.gv@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 15.04.2026 г.

© Чернуха Д.Г., Загороднюк Л.Х., Иванов Г.В., 2026

**Chernukha D.G., Zagorodnyuk L.Kh., Ivanov G.V.
Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov
Email: callipso71@yandex.ru

EFFECT OF MECHANOACTION IN A VIBRATION MILL ON THE PROPERTIES OF BINDING COMPOSITIONS WITH THE ADDITION OF VOLCANIC SAND

Abstract. The paper examines composite binders based on Portland cement and volcanic sand, subjected to mechanical activation in a vibrating mill. Rational grinding parameters (10, 30, and 50 minutes) and filler content (10–30 %) were determined. It was found that under optimal conditions, the specific surface area reaches 731.2 m²/kg, and the compressive strength increases to 90.34 MPa after 28 days, which is 77.8 % higher than that of commercial cement. Laser granulometry and X-ray phase analysis revealed the hardening mechanisms associated with the amorphization of the structure, a decrease in the average diameter of the particles and the formation of additional hydrosilicate phases. The possibility of saving Portland cement up to 30% without loss of strength characteristics is shown. Mechanical activation promotes a more complete course of hydration, which is confirmed by an increase in the content of low-base calcium hydrosilicates. The obtained composites are recommended for the manufacture of high-strength concrete, road surfaces and low-rise construction, as well as for the production of small-piece products (paving slabs, wall blocks) and structures. Further research is aimed at assessing frost resistance and durability in aggressive environments. The economic effect is achieved by replacing part of the clinker with man-made raw materials while maintaining the high operational properties of the material.

Keywords: mechanical activation, vibrating mill, volcanic sand, composite binder, specific surface area, compressive strength, granulometric composition, X-ray phase analysis.

REFERENCES

1. Lesovik V.S., Alfimova N.I., Yakovlev E.A., Sheichenko M.S. On the problem of increasing the effectiveness 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., Shadsky 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 the 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 modifitsirovannyye betony v sovremennykh sooruzheniyakh]. Concrete and Reinforced Concrete. Equipment. Materials. Technologies. 2011. Issue 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 stroitel'stva v severnykh regionakh]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 11. Pp. 42–46. (rus)
5. Grishina A.N. Composite binders for special purpose building mortars [Kompozitsionnye vyazhushchie dlya stroitel'nykh rastvorov spetsial'nogo naznacheniya]. ALITinform: Cement. Concrete. Dry mixes. 2024. No. 1(74). Pp. 25–34. (rus)
6. Mukhamedbaeva Z., Eshmuratova R., Aliyeva R., Karimov M. Sulfate-resistant cement modified with waste from a mining and processing plant. Universum: technical sciences. 2024. No. 11-12(128). Pp. 26–31. DOI: 10.32743/UniTech.2024.128.11.18625.
7. Romanenko I.I., Fadin A.I., Petrovnina I.N. Composite binder for the production of reinforced concrete products in factory conditions [Kompozitsionnoe vyazhushchee dlya proizvodstva zhelezobetonnykh izdeliy v zavodskikh usloviyakh]. Regional architecture and construction. 2024. No.

3(60). Pp. 26–31. DOI: 10.54734/20722958_2024_3_26. (rus)

8. Chernyshov S.A., Drebot A.M. The cement industry: the history of its origin and development [Tsementnaya otasl': istoriya vozniknoveniya i razvitiya]. Initiatives of the young - science and production: collection of articles of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students. Penza: Penza State Agrarian University, 2024. Pp. 76–80. (rus)

9. Sokolova S.V. Modification of special-purpose concrete by structural modification [Modifikatsiya betonov spetsial'nogo naznacheniya putem strukturnoy modifikatsii]. New materials and technologies in mechanical engineering. 2025. No. 42. Pp. 25–28. (rus)

10. Thet N.M., Krivoborodov Yu.R., Htet P.A. Composite cements with increased corrosion resistance [Kompozitsionnye tsementy s povyshennoy korrozionnoy stoykost'yu]. Butlerov communications. 2025. Vol. 83, No. 9. Pp. 47–55. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-83-9-47. (rus)

11. Pshenichny G.N. On the hardening of Portland cement and more... Part 1. Hardening of building gypsum [O tverdenii portlandtsementa i ne tol'ko... Chast' 1. Tverdenie stroitel'nogo gipsa]. Technologies of concrete. 2025. No. 4(201). Pp. 71–75. (rus)

12. Kaplenko O.A., Sigitova I.S. The effect of active mineral additives on the properties of cement and concrete [Vliyanie aktivnykh mineral'nykh dobavok na svoystva tsementa i betona]. University science. 2016. No. 2(2). Pp. 36–38. (rus)

13. Kovalchenko O.V., Alfimova N.I. On the issue of the use of volcanic activity products in building materials science [K voprosu o primenении produktov vulkanicheskoy deyatel'nosti v stroitel'nom materialovedenii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 6. Pp. 24–28. DOI: 10.12737/article_5926a0593fffb1.48828859. (rus)

14. Lesovik V.S., Goncharov R.Yu., Bogun N.V. Experience and prospects of using mineral fillers for concrete [Opyt i perspektivy primeneniya mineral'nykh napolniteley dlya betonov]. University Science. 2025. No. 1(19). Pp. 55–57. (rus)

15. Kulikova E.S., Krivun E.A. Mineral resources of the Kamchatka Territory and their use in the construction complex [Mineral'no-syr'evye resursy Kamchatskogo kraya i ikh ispol'zovanie v stroitel'nom komplekse]. Technical sciences - from theory to practice. 2016. No. 57. Pp. 150–154. (rus)

16. Chernukha D.G., Ivanov G.V., Sorokin M.A. Concretes using Khalaktyr volcanic sand: engineering and geological features, properties and application prospects [Betony s ispol'zovaniem Khalaktyrskogo vulkanicheskogo peska: inzhenerno-geologicheskie osobennosti, svoystva i perspektivy primeneniya]. Modern concretes and technologies: problems, solutions, prospects: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference. Krasnodar: Publishing House-Yug, LLC, 2025. Pp. 83–87. (rus)

17. Alfimova N.I., Kalatozi V.V., Karatsupa S.V., et al. Mechanical activation as a way to increase the efficiency of using raw materials of various genesis in building materials science [Mekhanooaktivatsiya kak sposob povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya syr'ya razlichnogo genezisa v stroitel'nom materialovedenii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 6. Pp. 85–89. (rus)

18. Nelyubova V.V., Rykunov A.M., Bondarenko A.I. Mechanical activation is an effective way to improve dry building mixes [Mekhanooaktivatsiya - effektivnyy sposob sovershenstvovaniya sukhikh stroitel'nykh smesey]. Innovations and modeling in building materials science: a collection of scientific papers. Tver: Tver State Technical University, 2017. Pp. 65–69. (rus)

19. Fedyuk R.S., Mochalov A.V., Lesovik V.S. Modern methods of activating binder and concrete mixtures (review) [Sovremennye sposoby aktivatsii vyazhushchego i betonnykh smesey (obzor)]. Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University. 2018. No. 4(37). Pp. 85–99. DOI: 10.5281/zenodo.2008670. (rus)

20. Pudova R.M. Investigation of the dynamics of sand grinding by a vibrating mill [Issledovanie dinamiki izmel'cheniya peska vibratsionnoy mel'nitsey]. Student Science and the XXI Century. 2020. Vol. 17, No. 2-1(20). Pp. 87–89. (rus)

21. Bogdanov V.S., Anciferov S.I., Bogdanov N.E., Nizhegorodov A.I., Sychyov E.A. The dependence of the productivity of a vibrating mill on its design and technological parameters [Zavisimost' proizvoditel'nosti vibratsionnoy mel'nitsy ot eyo konstruktivnykh i tekhnologicheskikh parametrov]. Cement and its application. 2023. No. 3. Pp. 46–49. (rus)

22. Bogdanov V.S., Anciferov S.I., Bogdanov N.E., Voronov V.P., Sychyov E.A. Kinetics of the process of grinding material in a vibrating mill [Kinetika protsessa izmel'cheniya materiala v vibratsionnoy mel'nitse]. STIN. 2023. No. 8. Pp. 5–7. (rus)

Information about the author

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.

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.

Ivanov, Georgy V. Student. E-mail: ivanov.gv@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 15.04.2026

Для цитирования:

Чернуха Д.Г., Загороднюк Л.Х., Иванов Г.В. Влияние механоактивации в вибрационной мельнице на свойства вяжущих композиций с добавлением вулканического песка // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 6. С. 25–37. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-6-25-37

For citation:

Chernukha D.G., Zagorodnyuk L.Kh., Ivanov G.V. Effect of mechanoactivation in a vibration mill on the properties of binding compositions with the addition of volcanic sand. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 6. Pp. 25–37. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-6-25-37