

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-8-17-27

**Загороднюк Л.Х., \*Чернуха Д.Г., Иванов Г.В., Сорокин М.А.***Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова**\*E-mail: callipso71@yandex.ru*

## **ВЛИЯНИЕ МЕХАНОАКТИВАЦИИ В РОТОРНО-ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ НА СВОЙСТВА ВЯЖУЩИХ КОМПОЗИЦИЙ С ДОБАВЛЕНИЕМ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПЕСКА**

**Аннотация.** В работе исследовано влияние механоактивации в роторно-шаровой мельнице на физико-механические свойства композиционных вяжущих на основе портландцемента и вулканического песка Халактырского месторождения. Экспериментально обоснованы рациональные параметры помола (10, 30 и 50 минут) и содержание минерального наполнителя (10-30 %). Установлено, что механоактивация позволяет достичь удельной поверхности до 847,7 м<sup>2</sup>/кг, что в 2,83 раза превышает показатель товарного цемента, при этом максимальная прочность при сжатии в возрасте 28 суток (82,7 МПа) зафиксирована для состава с 10 % песка после 10 минут активации, что на 62,8 % выше контрольного значения. Показана возможность экономии портландцемента до 20–30 % без снижения эксплуатационных характеристик. Методами рентгенофазового анализа выявлено, что интенсификация гидратации связана с аморфизацией структуры, снижением содержания портландита и накоплением гидросиликатов кальция. Установлено, что увеличение времени помола свыше 30 минут оказывает неоднозначное влияние на прочность из-за конкуренции процессов измельчения и агрегации частиц. Полученные композиты рекомендуются для производства бетонов общестроительного и специального назначения, а также в качестве основы для сухих строительных смесей.

**Ключевые слова:** механоактивация, роторно-шаровая мельница, вулканический песок, вяжущие композиции, удельная поверхность, рентгена-фазовый анализ, прочность при сжатии, сроки схватывания.

**Введение.** Современное строительное материаловедение всё больше ориентируется на использование вяжущих композиций [1–5], позволяющих снизить расход портландцемента при сохранении или даже повышении эксплуатационных характеристик. Одним из перспективных направлений является применение природных вулканических пород [6–7], содержащих активный кремнезём. Однако, низкая реакционная способность вулканических песков требует их дополнительной активации. Эффективным методом является механоактивация [8–10] в высокоэнергетических современных мельницах. Наряду с вибрационными установками [11–13], значительный интерес представляют роторно-шаровые мельницы [14], обеспечивающие интенсивное измельчение за счёт сложного характера движения шаровой загрузки. В литературе недостаточно данных о влиянии режимов помола в роторно-шаровой мельнице на свойства вяжущих композиций с вулканическим песком, что определяет актуальность настоящего исследования.

**Материалы и методы.** Использовались портландцемент АО «Себряковцемент» ЦЕМ I 42,5Н (удельная поверхность 300 м<sup>2</sup>/кг, предел прочности при сжатии цементного камня 50,8 МПа) и вулканический песок Халактырского пляжа Камчатского полуострова фракции <5 мм. Механоактивацию проводили в роторно-шаровой мельнице. Варьировали время помола (10, 30

и 50 мин) и содержание песка (10, 20, 30 %). Удельную поверхность определяли по ГОСТ 310.2-76, сроки схватывания – по ГОСТ 310.3-76, прочность при сжатии – по ГОСТ 310.4-81. Составы приведены в (табл. 1).

**Основная часть.** Анализ полученных результатов (табл. 1) показывает, что механоактивация в роторно-шаровой мельнице значительно увеличивает удельную поверхность всех вяжущих композиций. Уже после 10 мин помола удельная поверхность составов 1ВР-3ВР составляет 666,5–683,5 м<sup>2</sup>/кг, что превышает удельную поверхность товарного цемента в 2,2–2,3 раза. При этом наибольшее значение зафиксировано для состава с 30 % песка (683,5 м<sup>2</sup>/кг), что объясняется лучшей размалываемостью вулканического песка по сравнению с клинкерными минералами.

Увеличение времени помола до 30 мин приводит к дальнейшему росту удельной поверхности: состав 6ВР (70 % цемента + 30 % песка) достигает 803,2 м<sup>2</sup>/кг. При 50 мин помола максимальная удельная поверхность зафиксирована для состава 9ВР (70 % цемента + 30 % песка) – 847,7 м<sup>2</sup>/кг, что в 2,83 раза выше товарного цемента (рис. 1). Это свидетельствует о высокой эффективности роторно-шаровой мельницы для тонкого измельчения многокомпонентных систем.

Таблица 1

**Составы на основе портландцемента и вулканического песка, полученные  
механоактивацией в роторно-шаровой мельнице**

| № составов                        | Состав, % |                     | НГ, % | Сроки схватывания, мин |       | R <sub>сж</sub> , МПа, в возрасте 28 сут | S, м <sup>2</sup> /кг |
|-----------------------------------|-----------|---------------------|-------|------------------------|-------|------------------------------------------|-----------------------|
|                                   | Цемент    | Песок вулканический |       | начало                 | конец |                                          |                       |
| исходный товарный цемент          |           |                     | 27,4  | 110                    | 135   | 50,8                                     | 300                   |
| продолжительность помола – 10 мин |           |                     |       |                        |       |                                          |                       |
| 1BP                               | 90        | 10                  | 28,8  | 114                    | 144   | 82,7                                     | 666,5                 |
| 2BP                               | 80        | 20                  | 31    | 122                    | 154   | 81,89                                    | 672,8                 |
| 3BP                               | 70        | 30                  | 31,3  | 123                    | 156   | 47,38                                    | 683,5                 |
| продолжительность помола – 30 мин |           |                     |       |                        |       |                                          |                       |
| 4BP                               | 90        | 10                  | 32,5  | 128                    | 159   | 61,78                                    | 733                   |
| 5BP                               | 80        | 20                  | 32,7  | 130                    | 163   | 72,45                                    | 708,1                 |
| 6BP                               | 70        | 30                  | 33,3  | 134                    | 166   | 36,29                                    | 803,2                 |
| продолжительность помола – 50 мин |           |                     |       |                        |       |                                          |                       |
| 7BP                               | 90        | 10                  | 33,5  | 135                    | 169   | 81,49                                    | 732,4                 |
| 8BP                               | 80        | 20                  | 33,9  | 136                    | 173   | 52,48                                    | 681,8                 |
| 9BP                               | 70        | 30                  | 34,5  | 139                    | 175   | 59,45                                    | 847,7                 |

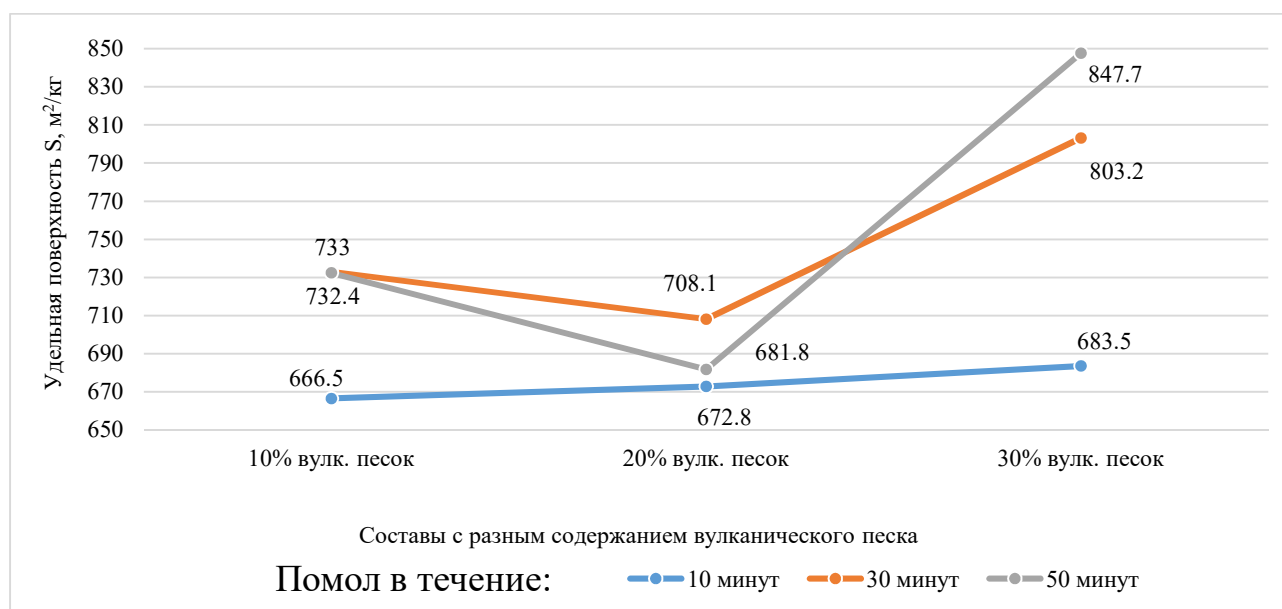


Рис. 1. Изменение удельной поверхности составов 1BP–9BP при различной продолжительности помола

Динамика изменения исследования составов 1BP–3BP прочности при сжатии (табл. 1, рис. 2) демонстрирует следующее: наилучший показатель получен для состава 1BP (90 % цемента + 10 % песка, 10 мин помола) – 82,7 МПа, что на 62,8 % выше товарного цемента; состав 2BP (80 % цемента + 20 % песка, 10 мин) показал 81,89 МПа (прирост 61,2 %); при введении 30 % песка (состав 3BP) прочность резко снижается до 47,38 МПа, что указывает на критическое снижение доли клинкерной составляющей.

Снижение удельной поверхности при увеличении дозировки песка с 10 до 20 % связано с амортизирующим эффектом песка, снижающим

эффективность измельчения, а рост прочности у состава 5BP при меньшей S объясняется тем, что песок при 30-минутном помоле предотвращает переактивацию и пассивацию клинкерной части, тогда как при 50-минутном помоле этот защитный эффект исчерпывается, и в составе 8BP преобладают агломерация, дезактивация клинкерных минералов и разбавляющее действие инертного песка, что ведёт к резкому падению прочности.

На (рис. 2) представлены результаты гранулометрического анализа вяжущих композиций с содержанием 90 % портландцемента и 10 % вулканического песка.

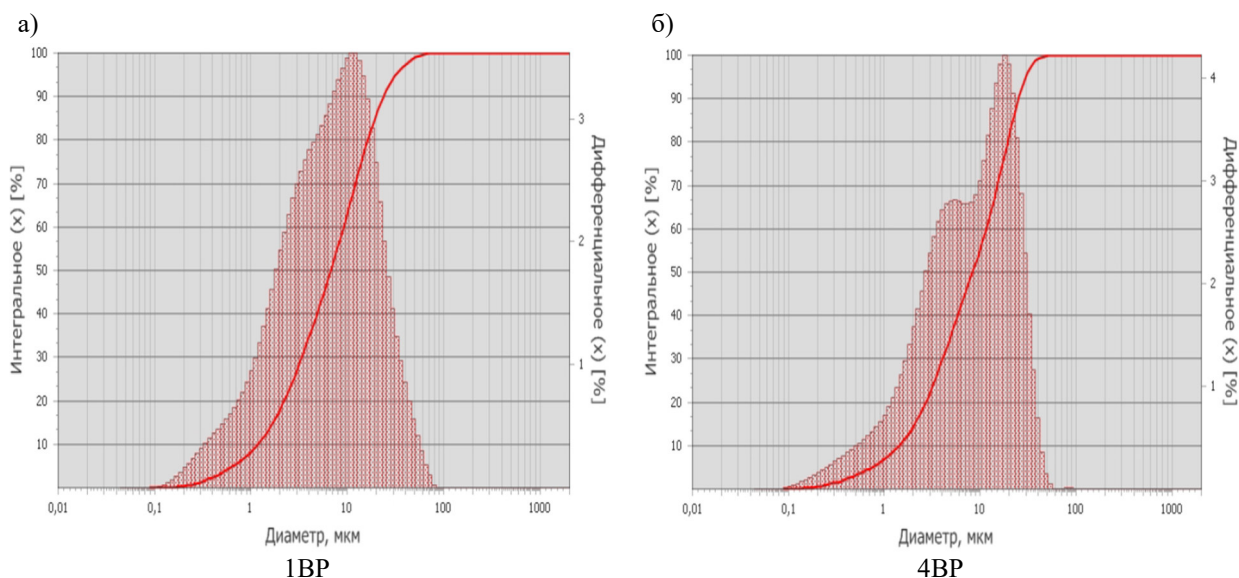


Рис. 2. Результаты гранулометрических исследований вяжущих композиций составов 90 % портландцемент + 10% вулканический песок: (а) 1BP – механоактивация в течение 10 минут; (б) 4BP – механоактивация в течение 30 минут

Для состава 1BP (механоактивация 10 мин, рис. 2а) характерно бимодальное распределение частиц с основным пиком в области 10-20 мкм и менее выраженным пиком в тонкодисперсной области (<1 мкм). После увеличения времени активации до 30 мин (состав 4BP, рис. 2б) распределение становится более узким и смещается в

сторону меньших размеров. Фиксируется увеличение доли частиц размером менее 5 мкм, что свидетельствует об эффективном разрушении крупных зёрен в начальный период помола.

На рисунке 3 показаны результаты гранулометрических исследований для составов 3BP и 6BP с 70 % портландцемента и 30 % вулканического песка.

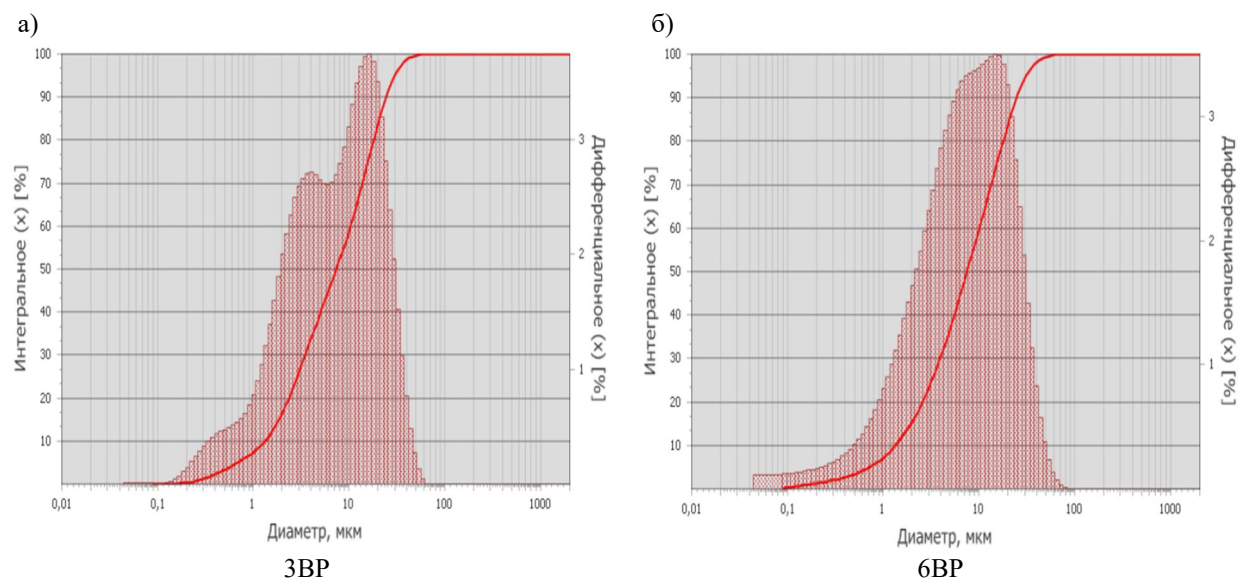


Рис. 3. Результаты гранулометрических исследований вяжущих композиций составов 70 % портландцемент + 30% вулканический песок: (а) 3BP – механоактивация в течение 10 минут; (б) 6BP – механоактивация в течение 30 минут

Состав 3BP (10 мин активации, рис. 3а) демонстрирует широкое распределение с наличием частиц в диапазоне от 0,5 до 80 мкм. При увеличении времени помола до 30 мин (состав 6BP, рис. 3б) наблюдается значительное сужение распределения и сдвиг максимума в область 5–15

мкм. Доля тонкой фракции (<3 мкм) возрастает, что указывает на более интенсивную механоактивацию смеси с повышенным содержанием вулканического песка.

Таким образом, увеличение времени механоактивации с 10 до 30 минут во всех исследованных составах приводит к измельчению частиц и увеличению однородности гранулометрического состава. Наиболее выраженный эффект зафиксирован для состава с 30 % вулканического песка (6ВР).

При увеличении времени помола до 30 мин прочность (рис. 4) несколько снижается: состав 4ВР – 61,78 МПа, состав 5ВР – 72,45 МПа. Состав 6ВР (30 % песка) демонстрирует минимальное значение 36,29 МПа. После 50 мин помола наблюдаются разнонаправленные изменения:

для состава 7ВР (10 % песка) прочность восстанавливается до 81,49 МПа, состав 8ВР (20 % песка) показывает лишь 52,48 МПа, а состав 9ВР (30 % песка) – 59,45 МПа.

Немонотонная зависимость прочности от времени механоактивации связана с конкуренцией процессов увеличения активной поверхности, агломерации и частичной дезактивации поверхности зерен. Оптимальной для данного состава является 10-минутная обработка (обеспечивает максимум прочности без переактивации), а 30-минутная – попадает в зону «структурного минимума», где негативные эффекты преобладают над позитивными.

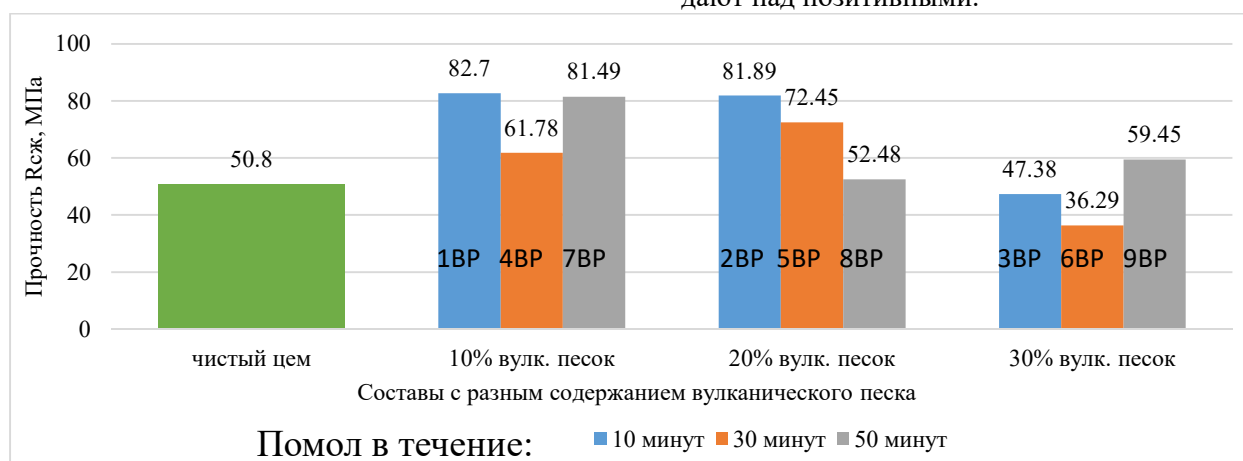


Рис. 4. Гистограмма прочностных показателей образцов составов 1ВР-9ВР

Сроки схватывания (табл. 1, рис. 5) закономерно увеличиваются, как с ростом доли вулканического песка, так и с увеличением времени механоактивации. Для состава 1ВР (10 мин, 10 % песка) начало схватывания – 114 мин, конец –

144 мин. Для состава 9ВР (50 мин, 30 % песка) – 139 и 175 мин соответственно. Все полученные значения удовлетворяют нормативным требованиям.

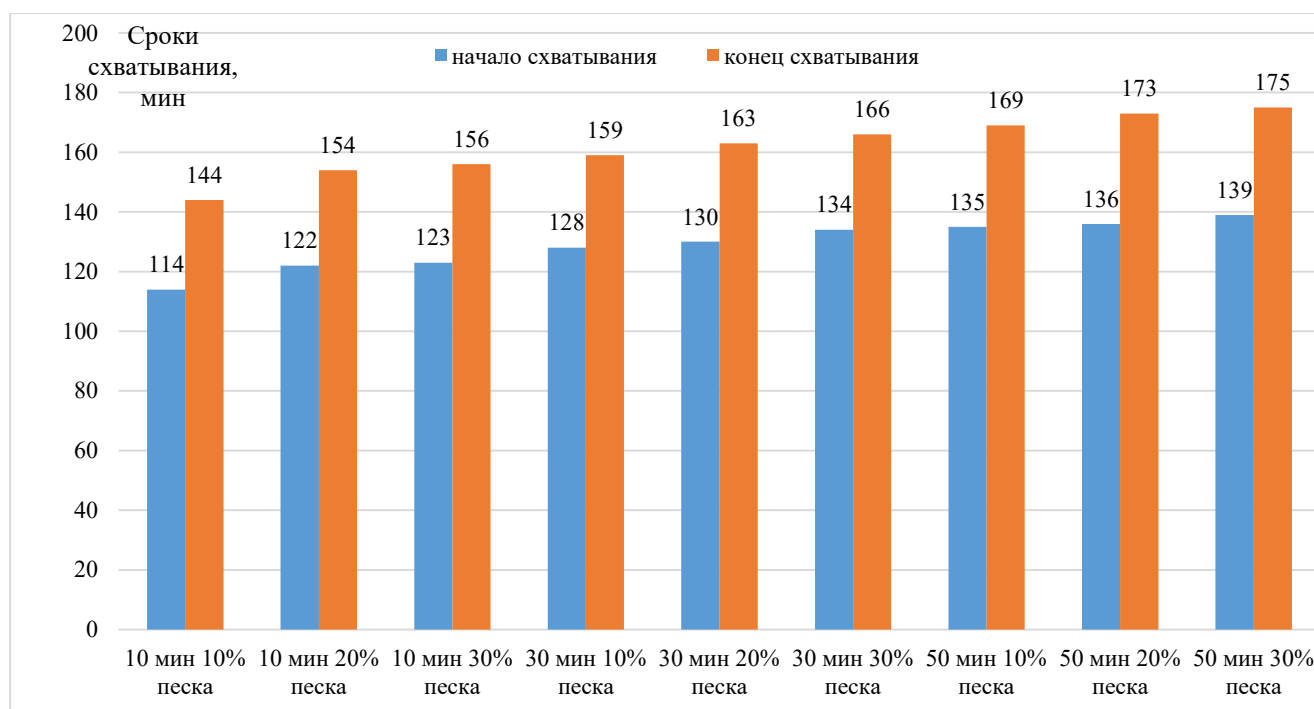


Рис. 5. Сроки начала и конца схватывания составов 1ВР-9ВР

Сравнение эффективности действий роторно-шаровой и вибрационной мельниц (по данным предшествующих исследований [15]) показывает, что роторно-шаровая мельница позволяет достичь более высоких значений удельной поверхности (до 847,7 м<sup>2</sup>/кг против 731,2 м<sup>2</sup>/кг), однако максимальная прочность несколько ниже (82,7 МПа против 90,34 МПа). Что можно объяснить природой механического воз-

действия: так в роторно-шаровой мельнице преобладают ударно-истирающие нагрузки, что эффективно для увеличения поверхности, но может приводить к накоплению микротрещин в клинкерных зёрнах, а также в минеральном наполнителе.

Фазовый состав гидратированных образцов после 28 суток твердения изучали методом рентгенофазового анализа (рис. 6–9).

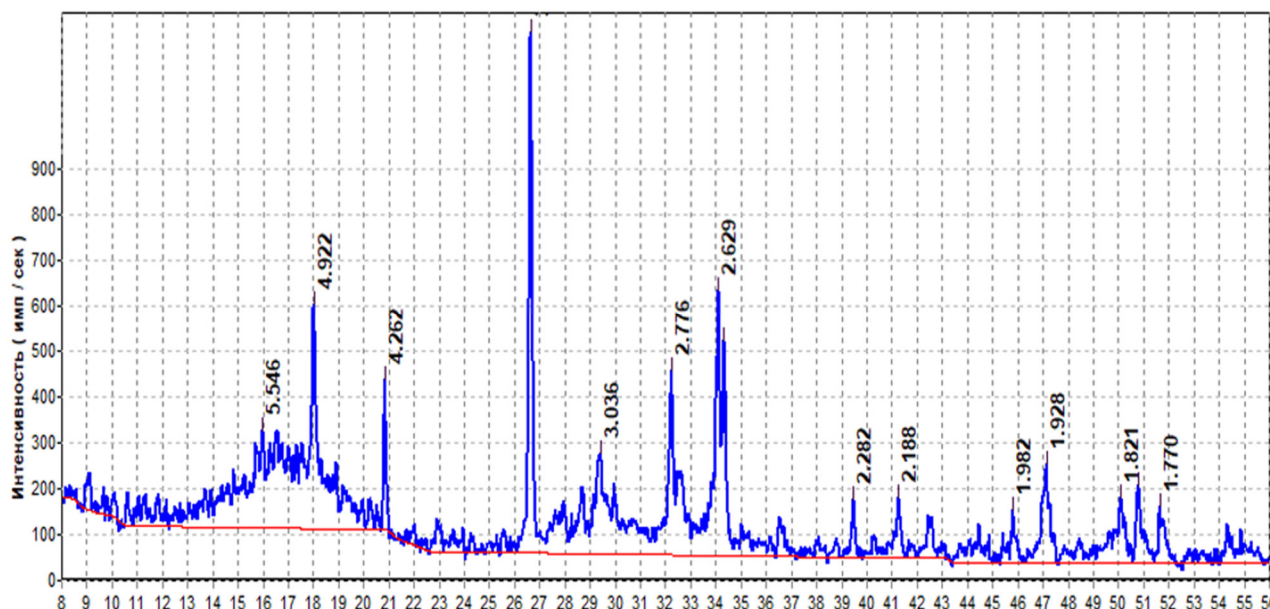


Рис. 6. Дифрактограмма гидратированной вяжущей композиции состава 1ВР (цемент-90 % + вулканический песок 10 %), механоактивированной в течение 10 мин в роторно-шаровой мельнице

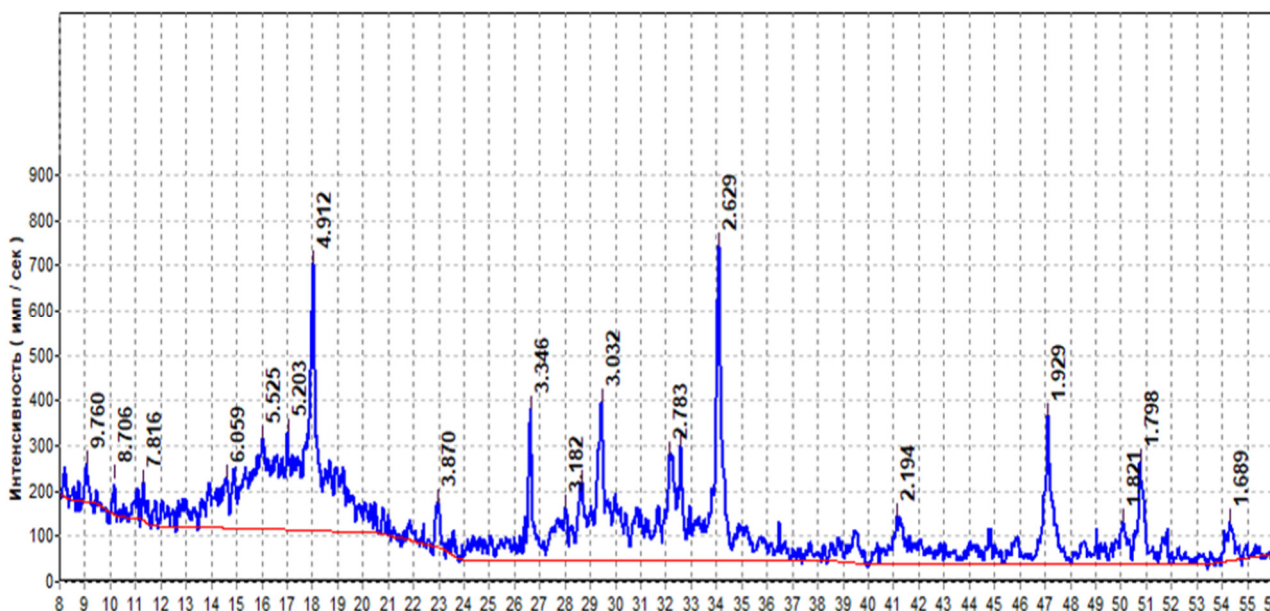


Рис. 7. Дифрактограмма гидратированной вяжущей композиции состава 4ВР (цемент-90 % + вулканический песок 10 %), механоактивированной в течение 30 мин в роторно-шаровой мельнице

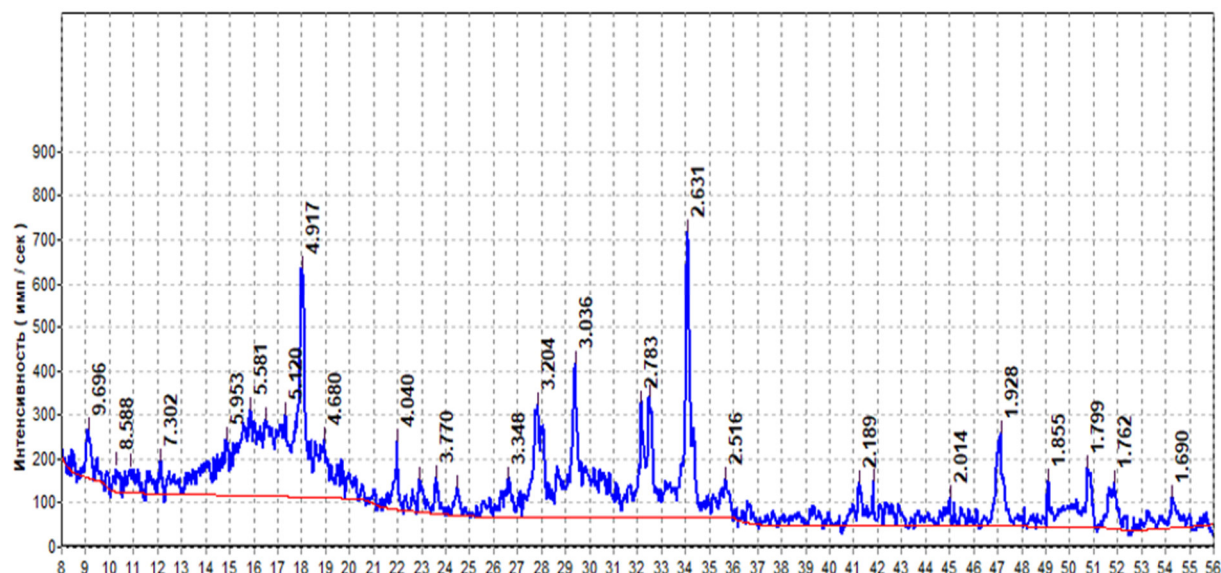


Рис. 8. Дифрактограмма гидратированной вяжущей композиции состава 3BP (цемент-70 % + вулканический песок 30 %), механоактивированной в течение 10 мин в роторно-шаровой мельнице

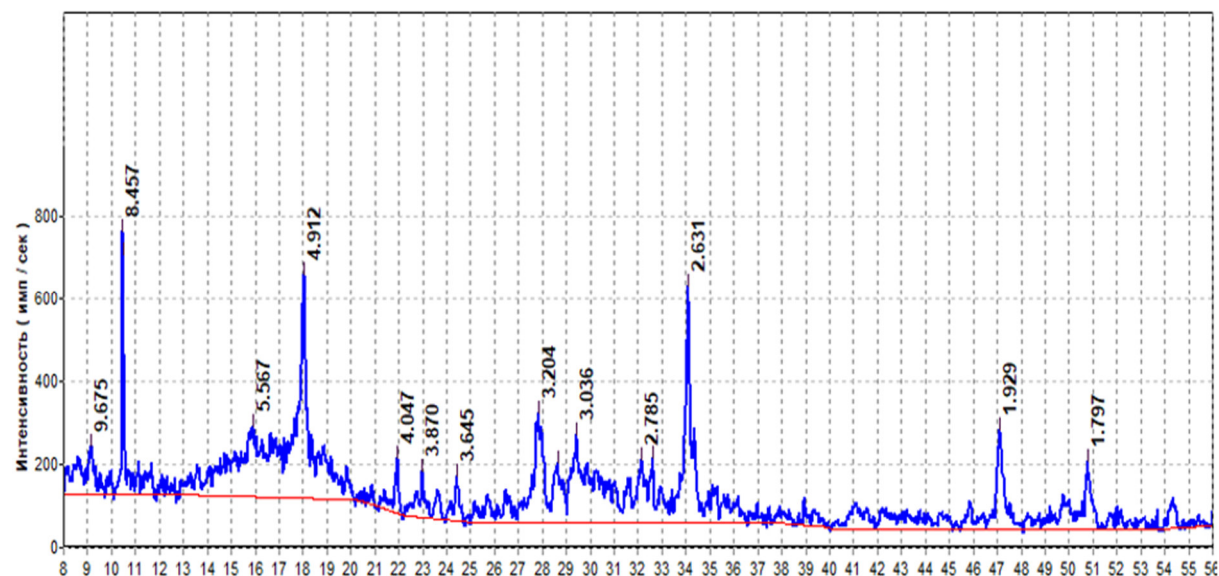


Рис. 9. Дифрактограмма гидратированной вяжущей композиции состава 6BP (цемент-70 % + вулканический песок 30 %), механоактивированной в течение 30 мин в роторно-шаровой мельнице

Состав 1BP (90 % цемента + 10 % песка, 10 мин активации, рис. 7).

На дифрактограмме идентифицированы основные фазы портландцементного клинкера: алит, белит, а также продукты гидратации – портландит  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ( $d = 4,93; 3,11; 2,63 \text{ \AA}$ ) и низкоосновные гидросиликаты кальция C-S-H ( $d = 9,8; 4,9; 3,07; 2,80; 2,00; 1,83 \text{ \AA}$ ). Присутствуют также рефлексы вулканического песка:  $\beta\text{-SiO}_2$ , андезин, анортит,  $\alpha$ -кristобалит. Интенсивность пиков портландита умеренная, что указывает на активное связывание извести продуктами пуццолановой реакции.

Состав 4BP (90 % цемента + 10 % песка, 30 мин активации, рис. 8).

По сравнению с 1BP наблюдается снижение интенсивности рефлексов портландита и некоторое увеличение аморфного гало в области  $20\text{--}35^\circ$ . Это свидетельствует о повышении реакционной способности системы за счёт более тонкого измельчения. Пики C-S-H сохраняются, дополнительных кристаллических новообразований не зафиксировано.

Состав 3BP (70 % цемента + 30 % песка, 10 мин активации, рис. 9).

Дифрактограмма аналогична по набору фаз, однако интенсивность пиков портландита ниже, чем у состава 1BP, что объясняется большим со-

держанием активного пуццоланового компонента. Широкий аморфный максимум указывает на высокую степень аморфизации массы.

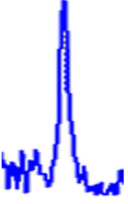
Состав 6BP (70 % цемента + 30 % песка, 30 мин активации, рис. 10).

Отмечается дальнейшее снижение интенсивности рефлексов  $\text{Ca(OH)}_2$  и увеличение

аморфного фона. Уширение пиков и рост аморфного фона указывают на накопление дефектов и уменьшение кристаллитности, что в условиях длительной механоактивации способствует агрегации тонкодисперсных частиц и, как следствие, ухудшению структуры и снижению прочности цементного камня.

Таблица 2

**Интенсивность дифракционных отражений  $\text{Ca(OH)}_2$ , CSH(II), гиролита, этtringита,  $\beta\text{-SiO}_2$ , андезина, анортита,  $\alpha$ -кristобалита в составах 1BP и 4BP композиционных вяжущих с вулканическим песком в возрасте 28 суток**

| Фрагмент дифрактограммы                     | Составы                                                                             |                                                                                       |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                                             | 90% ПЦ / 10% вулк. песок                                                            |                                                                                       |
|                                             | 1BP (10 мин помол)                                                                  | 4BP (30 мин помол)                                                                    |
| $\text{Ca(OH)}_2$<br>$d=4,93\text{\AA}$     |    |    |
| CSH(II)<br>$d=3,07\text{\AA}$               |  |   |
| Гиролит<br>$d=2,85\text{\AA}$               |  |  |
| Этtringит<br>$d=9,73\text{\AA}$             |  |  |
| $\beta\text{-SiO}_2$<br>$d=3,34\text{\AA}$  |  |  |
| Андезин<br>$d=3,18\text{\AA}$               |  |  |
| Анортит<br>$d=4,05\text{\AA}$               |  |  |
| $\alpha$ -кristобалит<br>$d=4,15\text{\AA}$ |  |  |

Сравнивая рентгенограммы составов 1BP (90 % цемента + 10 % вулканического песка, 10

мин механоактивации) и 4 ВР (90 % цемента + 10 % вулканического песка, 30 мин механоактивации) отмечается, что в них присутствуют основные гидратированные минералы портландцемента, продукты взаимодействия с активированным минеральным наполнителем, а также минералы, внесенные вулканическим песком:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CSH}(\text{II})$ , гиrolит, эттрингит,  $\beta\text{-SiO}_2$ , андезин, анортит,  $\alpha$ -кristобалит. Отмечается высокая кристалличность, четко отраженная на рентгенограмме состава 4ВР. Сравнивая показатели прочности состава 1ВР ( $S=665,5 \text{ м}^2/\text{кг}$ ,  $R_{\text{сж}}=82,7 \text{ МПа}$ ) и 4ВР ( $S=733 \text{ м}^2/\text{кг}$ ,  $R_{\text{сж}}=61,78 \text{ МПа}$ ) отмечается, что высокая аморфизация, обусловленная значительным показателем удельной поверхности состава 4ВР, свидетельствует о переизмельчении системы, в которой разрушается каркас, создаваемый крупными зернами и приводит к снижению прочности на 25%.

Таким образом, полученные результаты рентгенофазовых исследований показывают, что основными причинами роста прочности служат аморфизация структуры, сокращение содержания свободного портландита, накопление гидросиликатов кальция.

**Выводы.** На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Максимальная прочность при сжатии в возрасте 28 суток (82,7 МПа) зафиксирована для состава 1ВР (90 % цемента + 10 % вулканического песка, 10 мин механоактивации), что на 62,8 % выше товарного цемента (50,8 МПа). Незначительно уступает ему состав 2ВР (80 % цемента + 20 % вулканического песка, 10 мин механоактивации) с показателем прочности равным 81,89 МПа, а также состав 7ВР (90 % цемента + 10 % вулканического песка, 50 мин механоактивации) с показателем прочности равным 81,49 МПа. Три варианта рекомендованы для практического использования.

2. Увеличение содержания вулканического песка до 30 % независимо от времени помола приводит к резкому падению прочности: от 36,29 МПа (состав 6ВР, 30 мин механоактивации) до 59,45 МПа (состав 9ВР, 50 мин механоактивации). Это свидетельствует о пределе пуццолановой активности наполнителя при данном способе активации.

3. Увеличение времени механообработки с 10 до 30 мин не даёт однозначного прироста прочности (например, для составов 1ВР и 4ВР с 10 % вулканического песка прочность снижается с 82,7 до 61,78 МПа). При 50 мин помола восстановление прочности наблюдается только для составов с 10 % вулканического песка (81,49 МПа),

что связано с конкуренцией процессов измельчения, агрегации частиц и накопления дефектов в клинкерных минералах.

4. Все исследованные композиции удовлетворяют нормативным требованиям. Сроки схватывания закономерно возрастают при увеличении как доли вулканического песка, так и продолжительности механоактивации (от 114/144 мин для 1ВР до 139/175 мин для 9ВР).

5. Рентгенофазовый анализ подтверждает, что механоактивация способствует снижению интенсивности пиков портландита (за счёт пуццолановой реакции) и увеличению аморфной фазы. Наиболее выраженные изменения характерны для составов с 30 % вулканического песка и длительностью помола 30 мин (6ВР), однако у таких образцов появляются признаки агрегации, негативно влияющие на прочность.

**Рекомендации для дальнейшей работы.** Для перспективных исследований рекомендованы составы, механоактивированные в течение 10 и 30 минут, особенно 1ВР и 2ВР, 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., 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. Гришина А.Н. Композиционные вяжущие для строительных растворов специального назначения // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2024. № 1(74). С. 25–34.

6. 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.

7. 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. Краснодар. ООО «Издательский Дом-Юг», 2025. С. 83–87.

8. Алфимова Н.И., Калатози В.В., Карацупа С.В. и др. Механоактивация как способ повышения эффективности использования сырья различного генезиса в строительном материаловедении // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 85–89.

9. 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.

10. 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

11. Пудова Р.М. Исследование динамики измельчения песка вибрационной мельницей // Студенческая наука и XXI век. 2020. Т. 17. № 2-1(20). С. 87–89.

12. Богданов В.С., Богданов Н.Э., Анциферов С.И., Нижегородов А.И., Сычев Е.А. Зависимость производительности вибрационной мельницы от её конструктивных и технологических параметров // Цемент и его применение. 2023. № 3. С. 46–49.

13. Анциферов С.И., Богданов В.С., Богданов Н.Э., Воронов В.П., Сычев Е.А. Кинетика процесса измельчения материала в вибрационной мельнице // СТИН. 2023. № 8. С. 5–7.

14. Радынский Л.А., Зимин А.М. Определение производительности по основным процессам роторно-шаровой мельницы // Механика XXI веку. 2021. № 20. С. 75–80.

15. 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: 10.34031/2071-7318-2026-11-6-25-37

#### *Информация об авторах*

**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.

**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.

**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.

**Сорокин Максим Александрович**, студент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: maks.soroki.soroki.5555@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

---

*Поступила 19.06.2026 г.*

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

**Zagorodnyuk L.Kh., \*Chernukha D.G., Ivanov G.V., Sorokin M.A.**

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

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

## THE EFFECT OF MECHANICAL ACTIVATION IN A ROTARY BALL MILL ON THE PROPERTIES OF BINDER COMPOSITIONS WITH THE ADDITION OF VOLCANIC SAND

**Abstract.** *The effect of mechanical activation in a rotary ball mill on the physico-mechanical properties of composite binders based on Portland cement and volcanic sand from the Khalaktyrskoye deposit is investigated. The rational parameters of grinding (10, 30 and 50 minutes) and the content of mineral filler (10-30%) have been experimentally substantiated. It was found that mechanical activation makes it possible to achieve a specific surface area of up to 847.7 m<sup>2</sup>/kg, which is 2.83 times higher than commercial cement, while the maximum compressive strength at the age of 28 days (82.7 MPa) is fixed for a composition with 10% sand after 10 minutes of activation, which is 62.8 % higher than the reference value. The possibility of saving Portland cement up to 20-30 % without reducing operational characteristics is shown. X-ray phase analysis revealed that the intensification of hydration is associated with amorphization of the structure, a decrease in the content of portlandite and the accumulation of calcium hydrosilicates. It has been found that an increase in the grinding time over 30 minutes has an ambiguous effect on strength due to the competition of the grinding and particle aggregation processes. The resulting composites are recommended for the production of general-purpose and special-purpose concrete, as well as as a base for dry building mixes.*

**Keywords:** *mechanical activation, rotary ball mill, volcanic sand, composite binder, specific surface area, compressive strength, setting time.*

### 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 kompozicionnyh vyazhushchih]. 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 kompozicionnyh vyazhushchih pri proizvodstve zhelezobetonnyh izdelij]. 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 modifitsirovannye betony v sovremennyh sooruzheniyah]. 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 [Kompozicionnoe vyazhushchee dlya monolitnogo stroitel'stva v severnyh regionah]. Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 11. Pp. 42–46. (rus)
5. Grishina A.N. Composite binders for special purpose building mortars [Kompozicionnye vyazhushchie dlya stroitel'nyh rastvorov special'nogo naznacheniya]. ALITinform: Cement. Concrete. Dry mixes. 2024. No. 1(74). Pp. 25–34. (rus)
6. 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 kraia i ih ispol'zovanie v stroitel'nom komplekse]. Technical sciences - from theory to practice. 2016. No. 57. Pp. 150–154. (rus)
7. 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. Krasnodar: Publishing House-Yug, LLC, 2025. Pp. 83–87. (rus)
8. 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 [Mekhanoaktivatsiya kak sposob povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya syr'ya razlichnogo genezisa v stroitel'nom materialovedenii]. Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2016. No. 6. Pp. 85–89. (rus)
9. Nelyubova V.V., Rykunov A.M., Bondarenko A.I. Mechanical activation - an effective way to improve dry building mixes [Mekhanoaktivatsiya - effektivnyj sposob sovershenstvovaniya suhikh stroitel'nyh smesey]. Innovations and modeling in building materials science: a collection of scientific papers. Tver: Tver State Technical University, 2017. Pp. 65–69. (rus)
10. Feduk R.S., Mochalov A.V., Lesovik V.S. Modern methods of activating binder and concrete mixtures (review) [Sovremennye sposoby aktivatsii vyazhushchego i betonnyh 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)

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

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

13. Antsiferov S.I., Bogdanov V.S., Bogdanov N.E., Voronov V.P., Sychev E.A. Kinetics of the

grinding process of material in a vibrating mill [Kinetika processa izmel'cheniya materiala v vibracionnoj mel'nice]. STIN. 2023. No. 8. Pp. 5–7. (rus)

14. Radynsky L.A., Zimin A.M. Determination of productivity on the main processes of a rotary ball mill [Opredelenie proizvoditel'nosti po osnovnym processam rotorno-sharovoj mel'nicy]. Mechanics of the XXI century. 2021. No. 20. Pp. 75–80. (rus)

15. Chernukha D.G., Zagorodnyuk L.Kh., Ivanov G.V. Study of mechanical activation in a vibration mill on the properties of binders with the addition of volcanic sand [Vliyanie mekhanoaktivatsii v vibracionnoj mel'nice na svoystva vyazhushchih kompozitsij s dobavleniem vulkanicheskogo peska]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 6. Pp. 25–37. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-6-25-37. (rus)

#### *Information about the authors*

**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.

**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.

**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.

**Sorokin, Maxim A.** Student. E-mail: maks.soroki.soroki.5555@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 19.06.2026*

#### **Для цитирования:**

Загороднюк Л.Х., Чернуха Д.Г., Иванов Г.В., Сорокин М.А. Влияние механоактивации в роторно-шаровой мельнице на свойства вяжущих композиций с добавлением вулканического песка // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 8. С. 17–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-8-17-27

#### **For citation:**

Zagorodnyuk L.Kh., Chernukha D.G., Ivanov G.V., Sorokin M.A. The effect of mechanical activation in a rotary ball mill on the properties of binder compositions with the addition of volcanic sand. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 8. Pp. 17–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-8-17-27