

Научная статья
УДК 539.4.01
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-4/3-17>

Оценка эффективности механической активации исходных компонентов композиционного материала на основе цемента

Анастасия Вячеславовна Пузатова[✉], Мария Александровна Дмитриева,
Владимир Нояхович Лейцин

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Российская Федерация

✉ a.v.puzatova@gmail.com

Аннотация. В настоящее время актуальным предметом исследования в области механики композитов является развитие начальной прочности композиционных материалов на основе цемента, включающее различные способы исследования процессов на ранних этапах механохимических превращений. При механической активации исходных компонентов бетонных композитов происходит изменение состояния вещества, вследствие чего повышается реакционная способность активируемых компонентов, что, в свою очередь, ведет к повышению начальной прочности композита. Целью данной работы является оценка эффективности механической активации компонентов композиционных материалов на основе цемента на ранних этапах набора прочности. Показано, что наибольший эффект достигается при механической активации бинарной композиции цемента и крупной фракции песка. При разработанном режиме механической активации прочность бетонных композитов на начальных этапах повышается кратно. Для достижения полученных в данной работе результатов необходимо увеличить удельную поверхность исходной цементно-песчаной композиции до определенного уровня. Полученная активированная цементно-песчаная композиция сохраняет эффективные свойства в течение практически значимого интервала времени (до 3 месяцев) при хранении в герметичной упаковке, а также может быть использована как основной структурообразующий компонент композиционного материала, так и в качестве модифицирующей добавки в бетонные композиты. Полученные в данной работе результаты по оценке эффективности механической активации могут быть использованы на заводах по производству сухих строительных смесей при внедрении технологии механоактивации исходных компонентов.

Ключевые слова: механическая активация, микромеханика, бетонный композит, реакционная способность, цемент, песок, начальная прочность

Для цитирования: Пузатова А.В., Дмитриева М.А., Лейцин В.Н. Оценка эффективности механической активации исходных компонентов композиционного материала на основе цемента // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 4(61). С. 3–17.

Original article

Evaluation of the efficiency of mechanical activation of the initial components of a cement-based composite material

Anastasiia V. Puzatova[✉], Maria A. Dmitrieva, Vladimir N. Leitsin

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation

✉ a.v.puzatova@gmail.com

Abstract. The development of the initial strength of cement-based composite materials, including various methods for studying processes at the early stages of mechanochemical transformations, is currently a relevant subject of research in the field of mechanics of composites. During mechanical activation of the initial components of concrete composites, a change in the state of the substance occurs, as a result of which the reactivity of the activated components increases, which, in turn, leads to an increase in the initial strength of the composite. The aim of this work is to evaluate the efficiency of mechanical activation of components of cement-based composite materials at early stages of strength gain. It was shown that the greatest effect is achieved by mechanical activation of a binary composition of cement and coarse sand fraction. With the developed mode of mechanical activation, the strength of concrete composites at the initial stages increases multiple times. To achieve the results obtained in this work, it is necessary to increase the specific surface area of the original cement-sand composition up to a certain level. The resulting activated cement-sand composition retains its effective properties for a practically significant period of time (up to 3 months) when stored in sealed packaging, and can also be used as the main structure-forming component of a composite material, and as a modifying additive in concrete composites. The results obtained in this work on the assessment of the efficiency of mechanical activation can be used in factories for the production of dry building mixtures when introducing the technology of mechanical activation of initial components.

Keywords: mechanical activation, micromechanics, concrete composite, reactivity, cement, sand, initial strength
For citation: Puzatova A.V., Dmitrieva M.A., Leitsin V.N. Evaluation of the efficiency of mechanical activation of the initial components of cement-based composite material. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 4(61), pp. 3–17. (In Russ.).

Введение

Современные многокомпонентные мелкозернистые бетоны – это композиционные материалы на основе цемента и комплекса различных заполнителей и добавок, которые придают композиту заданные свойства. При описании и прогнозировании свойств многокомпонентных бетонов используется подход микромеханики композиционных материалов, позволяющий связывать механические характеристики композита со структурными параметрами и свойствами составляющих его компонентов. В данной работе предложена оценка эффективности механической активации исходных компонентов мелкозернистой бетонной смеси, применяемой с целью увеличения эксплуатационных характеристик композита на ранних сроках набора прочности.

Вопросам модификации свойств и структуры композиционных материалов путем механической активации посвящены многочисленные исследования таких ученых, как Е.Г. Аввакумов, В.В. Болдырев, В.И. Молчанов, И.Г. Совалов, В.И. Соломатов, Ю.Г. Хаютин, Г.С. Ходаков и многие другие. Установлено, что при механической активации дисперсных минеральных твердых веществ в некоторых компонентах твердого тела создаются напряжения с последующей их релаксацией. За счет этого происходит изменение энергетического состояния вещества, повышение реакционной активности путем разрушения частиц, флокуляционных структур, образования свежих развитых и химически активных поверхностей с высокой реакционной способностью. Наибольший эффект от механической активации применительно бетонным композитам достигается при получении полифункциональных комплексных модификаторов, в состав которых входит два и более механоактивированных компонента различных классов [1].

Современными исследователями поднимается вопрос введения механоактивации компонентов в технологических режимах подготовки сухих строительных смесей. Существующий метод повышения прочности бетона на ранних сроках твердения, такой как пропаривание, применимый на заводах уже более 50 лет, является энергозатратной технологией. Пропарочные камеры имеют невысокий коэффициент полезного действия, а структура цементного камня в процессе пропаривания ухудшается, что может привести к снижению качества готовой продукции [2]. Актуальной задачей современного строительного материаловедения является получение бетонных композитов с повышенными физико-механическими показателями

при сниженных энерго- и ресурсозатратах. При этом важными показателями является сокращение времени выдержки бетона в опалубке, сокращение или отказ от тепловлажностной обработки и уменьшение расхода цемента.

В работе рассматривается возможность активации как основного вяжущего, так и других составляющих композиционного материала. Методам механической активации цемента посвящены исследования [3, 4], влияние механической активации дополнительных вяжущих материалов, таких как зола-уноса, микрокремнезем, а также других природных минеральных дисперсных материалов, рассмотрено в [5–8]. Особый интерес вызывает механическая активация инертного заполнителя, так как такой недорогой материал, как песок, после механической активации влияет на структурообразование всего композита. Авторы [9, 10] показывают, что при активном механическом воздействии разрушается кристаллическая решетка зерен песка, вследствие чего образуется активная аморфная фаза тонкодисперсного порошка, вызывающая рост активности поверхности. Помимо образования активных центров на свежесформированной поверхности зерен песка, повышается структурообразующая роль песка в матрице цементного камня с закреплением зародышей новообразований продуктов гидратации цемента [11]. Применение наполнителя на основе активированных кварцевых отходов в технологии приготовления бетонов позволяет повысить прочность бетонного композита и уменьшить его теплопроводность [12, 13]. При совместной активации цемента и песка повышается реакционная способность цементного вяжущего [14–18]. Путем измельчения мелких некондиционных песков и портландцемента в присутствии суперпластификатора можно получить смешанное вяжущее повышенных марок по прочности, что способствует экономии цемента и улучшению эксплуатационных свойств бетонного композита [16].

На основании вышесказанного можно заключить, что механическая активация компонентов мелкозернистых бетонов является актуальным предметом исследования и открывает перспективы для получения новых качественных композиционных материалов с применением природного или техногенного сырья. Целью данной работы является развитие метода оценки эффективности механической активации компонентов композиционных материалов на основе цемента, которая может быть применена в технологических режимах подготовки сухих строительных смесей.

Материалы и методы

Для проведения механической активации используется высокоскоростная шаровая мельница Retsch EMax. В качестве мелющих тел используются корундовые шары диаметром 6 и 10 мм в равных пропорциях по массе, соотношение массы мелющих тел к измельчаемому материалу 2:1.

Прочностные характеристики композитов на различных этапах механохимических превращений определяются на образцах-кубиках размером 20x20x20 мм, размер образцов выбран исходя из условий представительности объема для описания эффективных свойств композита. На начальных этапах механохимических превращений образцы испытываются на прессе Instron с максимальным нагружением 1 кН, на более поздних сроках – на испытательной машине ToniNorm с максимальным нагружением 300 кН.

Калориметрические исследования для оценки тепловыделения химических реакций модифицированных цементных систем проводятся в 8-канальном изотермическом калориметре TAM Air.

Для оценки эффективности механической активации компонентов бетонных композитов проводятся следующие эксперименты:

Определение эффективного времени активации. Для выбора времени активации используется калориметрический анализ активированного при скоростях 1400 и 2000 об/мин цемента, рассматриваются серии активаций при 3, 5 и 7 минутах, данные сравниваются с неактивированным цементом. Оцениваются прочностные показатели композитов с активированным при 1400 об/мин цементом при возрасте образцов 6 и 10 часов.

Определение интенсивности активации компонентов и их композиций. Проводятся серии активаций отдельных компонентов и их композиций мелкозернистой бетонной смеси при скоростях активации 500, 750 и 1000 об/мин. Рассматриваются активации цемента, золы-уноса, песка и совместные активации цемента и золы-уноса, цемента и песка. Состав компонентов в каждом изготовленном образце модифицированного композита постоянный. Определяются прочностные показатели полученных модифицированных композитов на начальных этапах механохимических превращений (до 7,5 часов твердения) [17].

Определение влияния дисперсности исходных компонентов на эффективность активации. Рассматривается влияние фракционного состава песка на эффективность активации, проводятся экспериментальные оценки влияния крупности песка на эффективность активированной цементно-песчаной композиции в мелкозернистых композитах. Для этого используются пески с разных месторождений Калининградской области, характеристики песков представлены в таблице 1. Эффективность оценивается прочностными показателями на ранних стадиях механохимических превращений (до 90 минут твердения) [18].

Таблица / Table 1

Характеристики используемых песков
Characteristics of the sands used

Месторождение	Группа песка по ГОСТ 8736-2014	Модуль крупности	Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	Истинная плотность, кг/м ³	Насыпная плотность, кг/м ³	Пустотность, %
Морской берег пос. Янтарный	Средний	2,2	-	2612	1474	43,6
Карьер пос. Синявино	Мелкий	2,0	2,2	2643	1330	49,7
Карьер Рыбачье	Очень мелкий	1,34	3,6	2551	1501	41,2

Определение параметров макрокинетики химических превращений в модифицированном композиционном материале. Применяется метод термомеханических испытаний для определения параметров макрокинетики реакции гидратации модифицированных композитов. В методе применяется уравнение Аррениуса, применимость которого для описания химических превращений в цементных системах доказана [19]. Метод основан на определении константы скорости реакции по степени гидратации образцов, выдержанных при трех различных температурах, степень гидратации в свою очередь оценивается отношением начальной прочности к марочной прочности композита, определенной в возрасте 28 суток. Более подробно метод описан в [20].

Определение характеристик полученной активированной композиции. С целью использования активированной композиции как добавки в бетонные композиты определяются ее характеристики в соответствии с ГОСТ Р 56592-2015 «Добавки минеральные для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия» и ГОСТ 25094-2015 «Добавки активные минеральные для цементов. Метод определения активности».

Определение стабильности эффективных свойств полученной активированной композиции в практически значимом временном диапазоне. Измеряются интенсивности тепловых потоков химических реакций активированных композиций, хранящихся в течение 3, 6, 9 и 12 месяцев, показатели сравниваются со свежеективированной композицией. Оцениваются прочностные показатели композитов в возрасте 1, 7 и 28 суток со свежеективированной композицией, а также с композициями, хранящимися 3 и 12 месяцев.

Определение возможности использования полученной активированной композиции в качестве модифицирующей добавки в бетонные композиты. Изготавливаются композиты начального состава цемент: песок:вода = 1:2,5:0,5 по массе, в которых 5% и 10% цемента заменены полученной активированной цементно-песчаной композицией. Реологичес-

кие характеристики свежей смеси и прочностные показатели в возрасте 7 суток оцениваются по ГОСТ 310.4-81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии», подвижность по ГОСТ 5802-86 «Растворы строительные. Методы испытаний», густота и сроки схватывания по ГОСТ 310.3-76 «Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема».

Результаты

После проведения испытаний по экспериментальному определению прочности образцов композиционных материалов, модифицированных механической активацией, была проведена статистическая обработка полученных данных. В ходе обработки для каждого эксперимента вычислены средние значения показателей прочности, среднеквадратические отклонения, среднеквадратические ошибки среднего арифметического, коэффициенты вариации. На основе этих данных для каждого эксперимента получены значения максимального относительного отклонения τ_{\max} , определены табличные значения для 3–6 испытаний при 1% уровне значимости $\tau_{\text{табл}}$. Во всех случаях $\tau_{\max} < \tau_{\text{табл}}$, следовательно, все испытания однородны, при их проведении грубой ошибки не допущено.

1. Определение эффективного времени активации

Результаты калориметрического анализа интенсивности теплового потока системы цемент+вода, при этом цемент активирован при скоростях 1400 об/мин и 2000 об/мин при различном времени активации, приведены на рисунке 1. По данным графика теплового потока модифицированного цемента определено, что активация при 5 и 7 минутах дает схожий эффект по увеличению реакционной способности активированного материала. При этом на активацию при 7 минутах тратится большее количество энергии при почти неизменном эффекте увеличения реакционной способности.

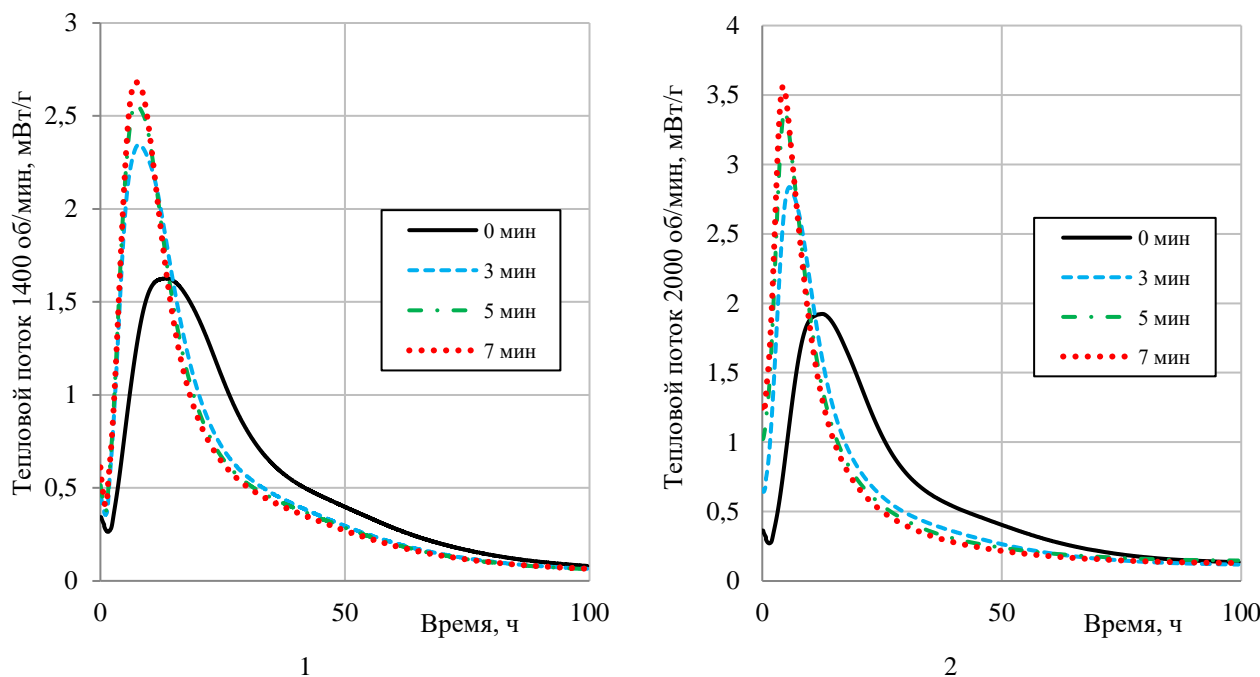


Рис. 1. Графики интенсивности теплового потока активированного цемента: 1 – активация при 1400 об/мин; 2 – активация при 2000 об/мин

Fig. 1. Graphs of heat flux intensity of activated cement 1 – activation at 1400 rpm; 2 – activation at 2000 rpm

На рисунке 2 приведены данные прочностных характеристик композита из неактивированного и активированного при скорости 1400 об/мин в течение разного времени цемента.

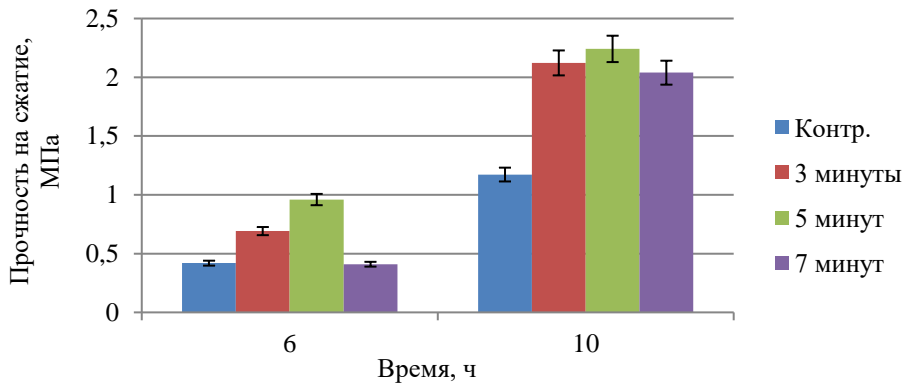


Рис. 2. Диаграмма развития начальной прочности образцов с активированным при скорости 1400 об/мин цементом

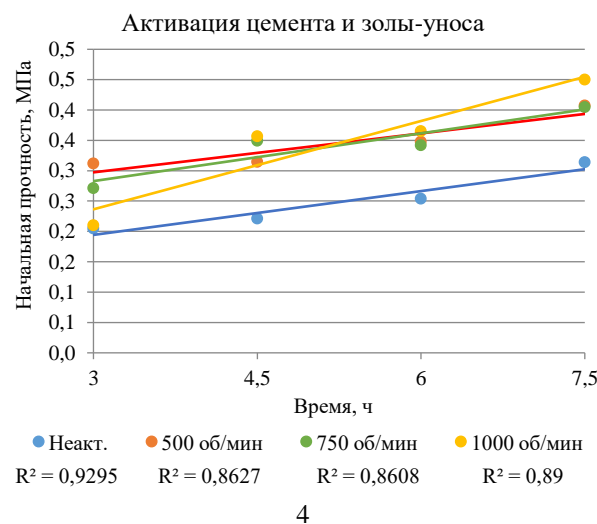
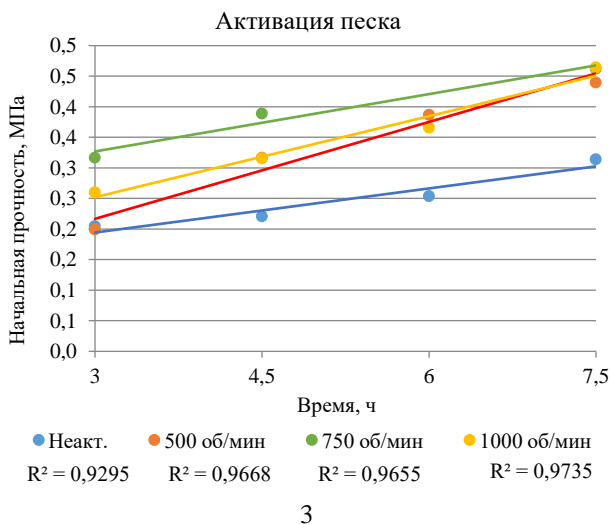
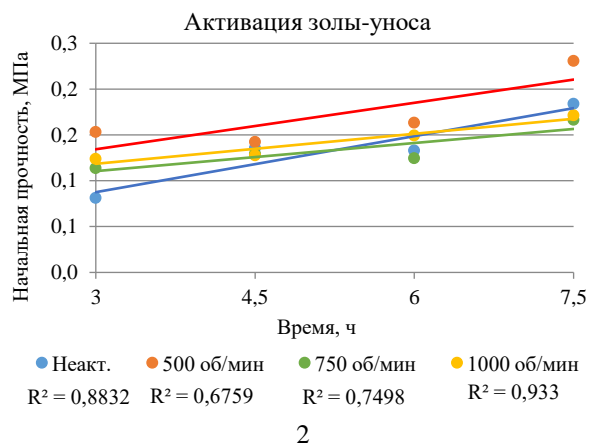
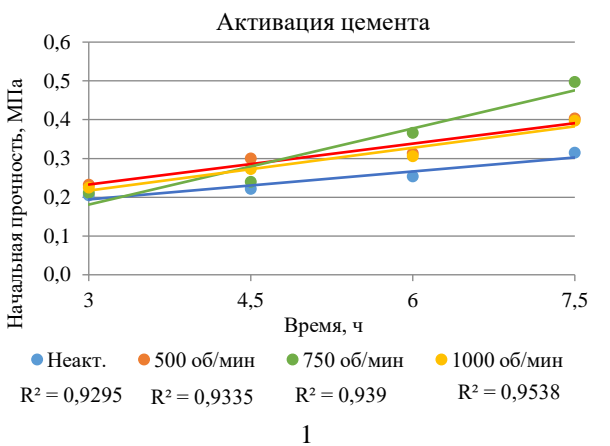
Fig. 2. Diagram of the development of the initial strength of samples with cement activated at a speed of 1400 rpm

Результаты испытаний на прочность показали, что наибольшую прочность через 6 и 10 ч набирали образцы из активированного в течение 5 минут цемента. Это означает, что в рассматриваемом случае существует эффективное время активации – t_{eff} , равное 5 минутам.

На основании калориметрического анализа и прочностных испытаний можно заключить, что существует эффективное время активации цемента t_{eff} .

2. Определение интенсивности активации компонентов и их композиций

Графики набора начальной прочности композитов с различным выбором активируемых компонентов и скорости активации приведены на рисунке 3.



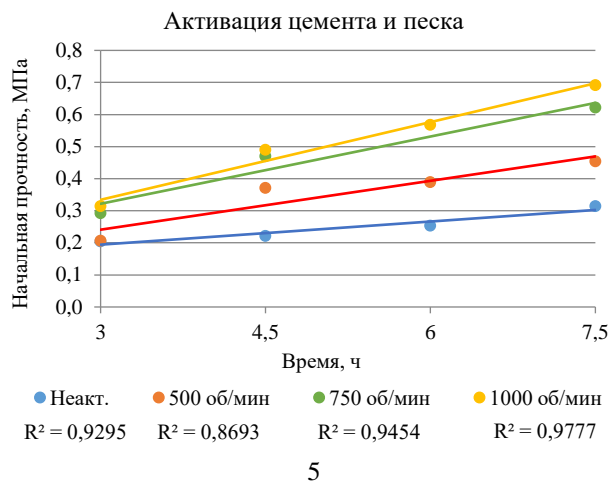


Рис. 3. Начальная прочность образцов с активированными компонентами: 1 – активированный цемент; 2 – активированная зола-уноса; 3 – активированный песок; 4 – активированная смесь цемента и золы-уноса; 5 – активированная смесь цемента и песка

Fig. 3. Initial strength of samples with activated components

1 – activated cement; 2 – activated fly ash; 3 – activated sand; 4 – activated mixture of cement and fly ash; 5 – activated mixture of cement and sand

По результатам экспериментальных исследований установлено, что механическая активация бинарной композиции исходных компонентов бетонных композитов эффективнее, чем механическая активация отдельных компонентов [17]. Наилучшие результаты наблюдаются при предварительной активации бинарной комбинации цемент+песок. При этом наблюдается сокращение сроков схватывания, на ранних сроках наблюдается двукратное увеличение показателей прочности образцов бетонов.

Для мельницы ЕМах в качестве эффективного принят режим активации цементно-песчаной композиции при $t_{eff} = 5$ мин и скорости $V = 1000$ об/мин.

3. Определение влияния дисперсности песка на эффективность активации

График развития начальной прочности композитов с различным исходным фракционным составом песка представлен на рисунке 4.

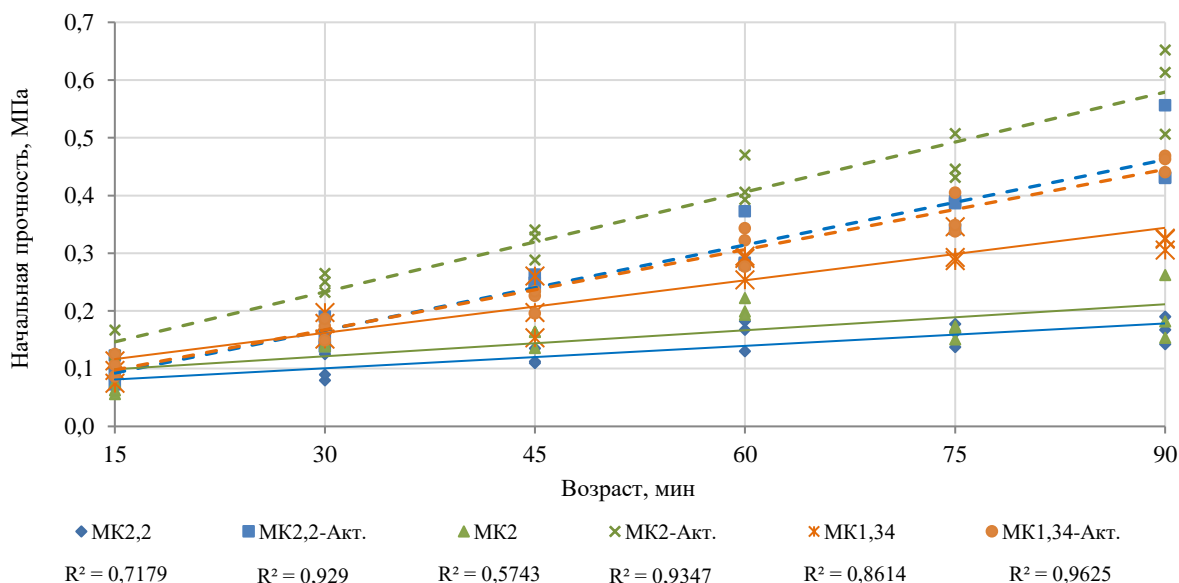


Рис. 4. Начальная прочность образцов при различной крупности песка с активацией и без активации

Fig. 4. Initial strength of samples with different sand sizes with and without activation

Эффект активации зависит от крупности песка, причем наблюдается немонотонный характер влияния интенсивной механической активации на свойства получаемых бетонов. Установлено, что механическая активация наиболее эффективна в случаях, когда в исходном песке присутствуют крупные фракции [18]. Принят следующий гранулометрический состав песка для активации: 70% – фракция 1,25–2,50 мм; 30% – фракция 0,315–0,630 мм.

4. Определение параметров макрокинетики модифицированных композитов

Получены значения кинетики набора прочности композитов с песком различной крупности, модифицированных механической активацией цемента и песка, данные представлены на рисунке 5. Здесь МК2,2 – состав с песком, имеющим модуль крупности 2,2; МК2,2-Акт. – тот же состав, модифицированный механической активацией цемента и песка; МК2 – состав с песком, имеющим модуль крупности 2; МК2-Акт. – тот же состав, модифицированный механической активацией цемента и песка. До проведения испытаний образцы выдерживались при трех различных температурах: 293К, 330К, 343К, в маркировке составов отображена температура выдержки.

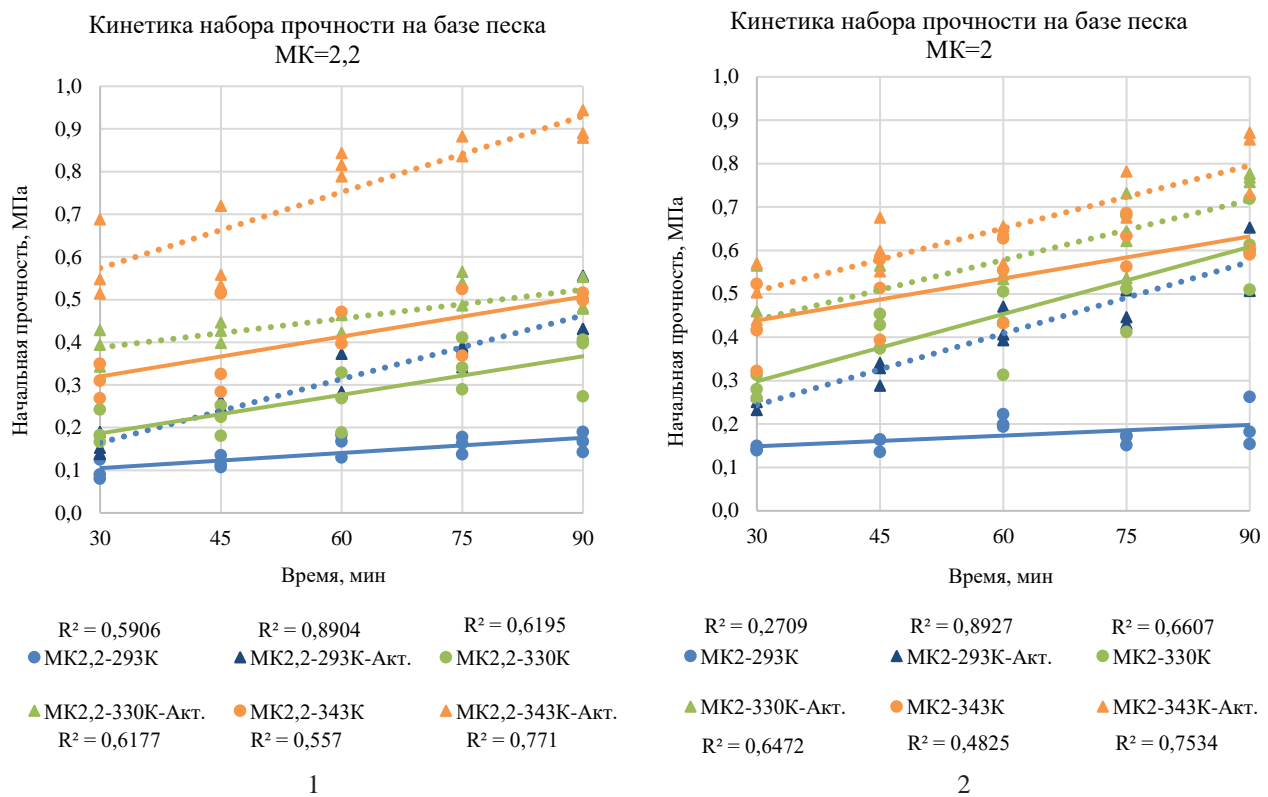


Рис. 5. Кинетика набора прочности образцов модифицированных составов: 1 – на базе песка с модулем крупности 2,2; 2 – на базе песка с модулем крупности 2

Fig. 5. Kinetics of strength gain of samples of modified compositions

1 – based on sand with a fineness modulus 2.2; 2 – based on sand with a fineness modulus 2

Из этих данных получены значения предэкспоненциального множителя A и энергии активации E_A (Таблица 2) для уравнения макрокинетики химических процессов гидратации в форме уравнения Аррениуса [20].

Таблица / Table 2

Параметры уравнения Аррениуса
Parameters of the Arrhenius equation

Состав	МК2,2	МК2,2-Акт.	МК2	МК2-Акт.
A	0,007	0,007	0,007	0,007
E_A , кДж/моль	22,3	20,5	21,2	20,1

Установлено, что энергия активации снижается при механической активации компонентов. Таким образом, экспериментально подтверждена эффективность механической активации цементно-песчаной композиции для композиционного материала на цементном вяжущем.

5. Определение характеристик композиции при разработанном режиме активации

Показатели полученной активированной цементно-песчаной композиции представлены в таблице 3. Установлено, что для достижения полученных в данной работе результатов необходимо увеличить удельную поверхность цементно-песчаной композиции в 2,5 раза.

Таблица / Table 3

Характеристики активированной цементно-песчаной композиции
Characteristics of activated cement-sand composition

Удельная поверхность цементно-песчаной композиции до активации S_{y01} , cm^2/g	1487,8
Удельная поверхность активированной композиции S_{y02} , cm^2/g	3690,8
Отношение удельных поверхностей композиций S_{y02}/S_{y01}	2,5
Истинная плотность, g/cm^3	2,9
Насыпная плотность, g/cm^3	0,9
Остаток на сите 016, %	2,0
Остаток на сите 008, %	4,5

6. Определение стабильности свойств механоактивированной цементно-песчаной композиции

График изменения интенсивности теплового потока механохимической реакции активированной цементно-песчаной композиции при хранении в течение 12 месяцев представлен на рисунке 6. Интенсивность теплового потока свежее активированной композиции и композиции, хранящейся в течение 3 месяцев, имеют схожий характер проявления, тогда как интенсивность при сроках хранения больше 6 месяцев монотонно снижается.

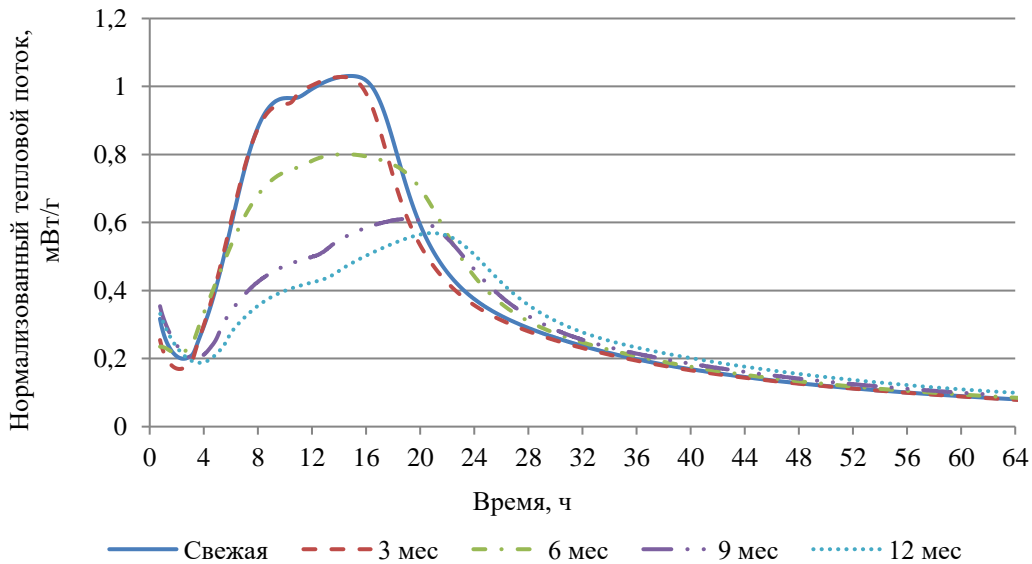


Рис. 6. График изменения интенсивности теплового потока при различном времени хранения активированной композиции
Fig. 6. Graph of changes in heat flux intensity for different storage times of the activated composition

Значения прочностных показателей композита со свежее активированными компонентами, а также с композицией, хранящейся в течение 3 и 12 месяцев, представлены на рисунке 7.

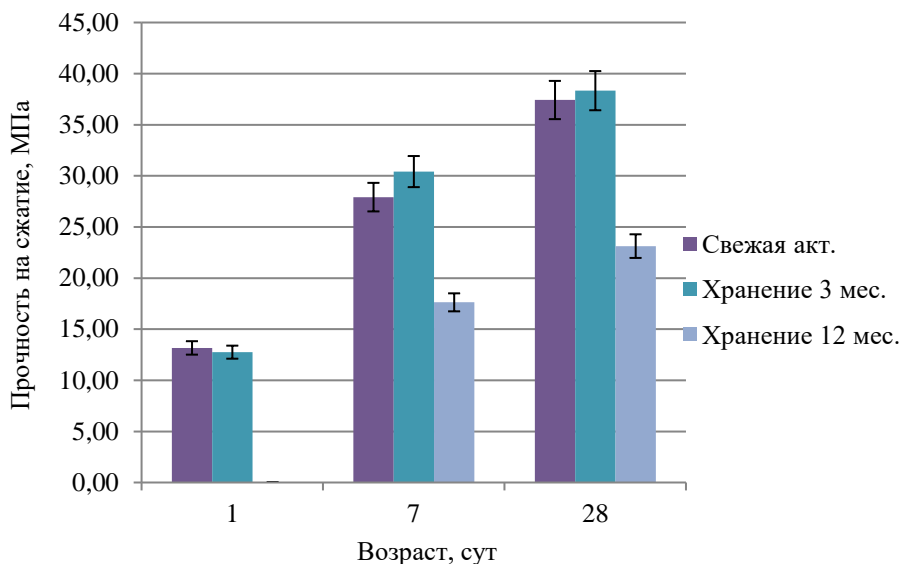


Рис. 7. Диаграмма изменения прочности образцов при различном времени хранения активированной композиции

Fig. 7. Diagram of changes in the strength of samples at different storage times of the activated composition

Прочностные показатели композитов, в состав которых входит свежая активированная композиция и композиция, хранящаяся 3 месяца, имеют схожий результат, разница в показателях в возрасте 1, 7 и 28 суток находится в пределах погрешности. Прочность композита из активированной смеси, хранящейся 12 месяцев, не удалось измерить в первые сутки твердения, так как образец к этому времени не набрал необходимой для фиксации прессом прочности. Для 7 и 28 суток твердения прочность активированной композиции со сроком хранения 12 месяцев существенно ниже прочности других рассматриваемых композиций.

По результатам экспериментальных исследований определено, что активированная цементно-песчаная композиция показывает высокую стабильность эффективных свойств в течение 3 месяцев после проведения активации, при условии хранения в герметичной упаковке.

7. Определение возможности использования полученной активированной композиции в качестве модифицирующей добавки в бетонные композиты

Реологические показатели смеси композита с 5% и 10% замены цемента разработанной активированной цементно-песчаной композицией представлены в таблице 4.

Таблица / Table 4

**Реологические характеристики смесей
Rheological characteristics of mixtures**

Состав, кол-во добавки от массы цемента	Распływ конуса, мм	Погружение конуса, мм	Густота по прибору Вика, мм	Плотность свежей смеси, г/см ³	Начало схватывания, мин	Конец схватывания, мин
0%	165,2	43	12	2,1	163	198
5%	140	46	7	2,3	133	213
10%	175,3	37	10	2,2	120	230

Время начала схватывания сокращается пропорционально количеству введенной добавки, тогда как время окончания схватывания, наоборот, увеличивается. Таким образом, наномодифицирующая добавка выступает в роли регулятора схватывания бетонной смеси.

Прочность модифицированных композитов в возрасте 7 суток представлена на рисунке 8. Немонотонный характер зависимости прочности от количества введенной добавки свидетельствует о возможности оптимизации состава.

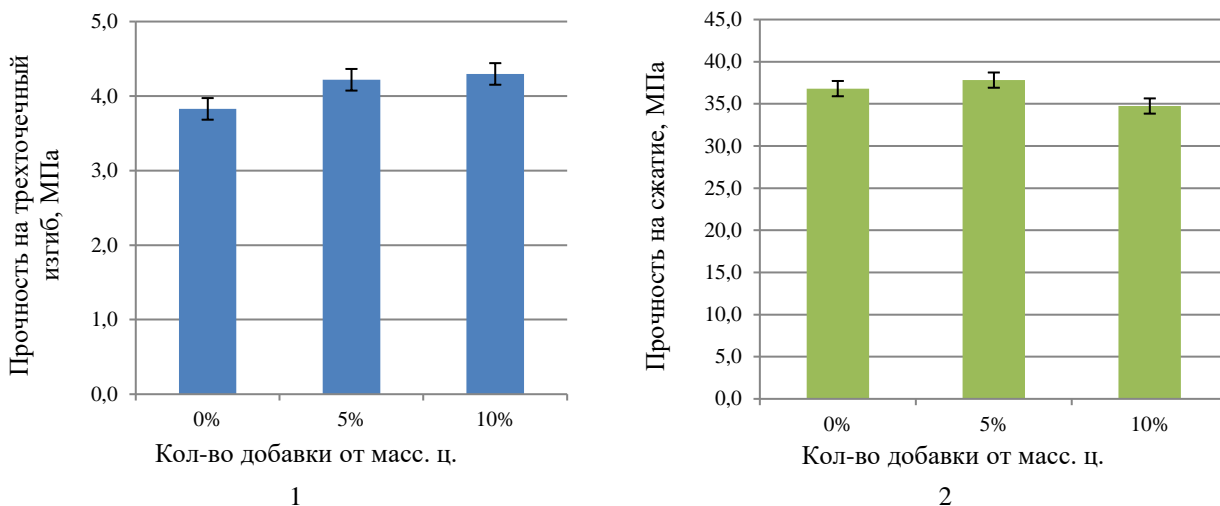


Рис. 8. Прочность модифицированного композита в возрасте 7 суток:

1 – прочность на трехточечный изгиб; 2 – прочность на сжатие

Fig. 8. Strength of the modified composite at the age of 7 days:

1 – three-point bending strength; 2 – compressive strength

Проведенные экспериментальные исследования доказывают применимость активированной цементно-песчаной композиции в качестве наномодификатора мелкозернистых бетонных композитов. Активированная цементно-песчаная композиция в малых процентах влияет на реологические свойства и улучшает прочностные характеристики на сжатие на ранних сроках, что важно, например, для реализации безопалубочной технологии укладки бетона.

Обсуждение результатов

В ходе проведенных исследований установлено, что эффективным временем активации t_{eff} компонентов композиционного материала на основе цемента в высокоскоростной шаровой мельнице Retsch EMax является 5 минут, активация при временах, больших t_{eff} , неэффективна, так как несущественно влияет на повышение реакционной способности компонентов. Установлено, что совместная активация цемента и песка в соотношении 1:2,14 при скорости 1000 об/мин дает наилучшие результаты в развитии механохимических превращений на начальных этапах и повышении эффективных свойств композита. На эффективность активации влияет дисперсность песка, показано, что в присутствии крупных частиц положительный эффект механической активации усиливается. Посчитаны макрокинетические показатели механохимических превращений модифицированных композитов, экспериментально доказано, что при механической активации энергия активации реагирующей системы уменьшается, что говорит о росте реакционной способности механоактивированной композиции. Определены характеристики полученной активированной цементно-песчаной композиции. Определено, что активированная цементно-песчаная композиция сохраняет свои эффективные свойства в течение 3 месяцев при хранении в герметичной упаковке. Путем введения активированной добавки в композиционный материал в малых процентах можно управлять реологическими свойствами, экономить цемент без потери прочностных показателей композита.

Заключение

В данной работе была проведена оценка эффективности механической активации бинарной композиции цемента и песка определенной granulometрии с целью повышения эксплуатационных характеристик композиционного материала на основе цемента на начальных этапах набора прочности. Механическая активация способствует раскрытию неиспользованного потенциала исходных компонентов бетонного композиционного материала. Предложено использование полученной активированной цементно-песчаной композиции в качестве нано-

модификатора свойств бетонных композитов, определена сохранность свойств активированной композиции в практически значимом временном диапазоне. Установлено, что для достижения полученных в данной работе результатов необходимо увеличить удельную поверхность цементно-песчаной композиции в 2,5 раза, этот показатель может быть рекомендован к использованию при масштабировании полученных данных на уровень производственной технологии.

В ходе проведенных экспериментов показана эффективность механической активации компонентов в развитии начальной прочности бетонного композита. Полученные результаты могут быть использованы на заводах по производству сухих строительных смесей при внедрении технологии механоактивации исходных компонентов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Когай Алине Дмитриевне, Товпинцу Александру Олеговичу за помощь в подготовке образцов и проведении механической активации компонентов бетонного композиционного материала.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

А. Пузатова – сбор данных, проведение экспериментов, интерпретация результатов, оформление научной статьи; М. Дмитриева – постановка задачи, научное сопровождение; В. Лейцин – редактирование статьи, формулировка выводов, научное сопровождение. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

A. Puzatova – data collection, conducting experiments, interpreting results, writing a scientific article; M. Dmitrieva – problem statement, scientific support; V. Leitsin – editing the article, formulating conclusions, scientific support. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | CONFLICT OF INTEREST

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алфимова Н.И., Калатози В.В., Карацупа С.В., Вишневская Я.Ю., Шейченко М.С. Механоактивация как способ повышения эффективности использования сырья различного генезиса в строительном материаловедении // Вестник Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 85–89. EDN: VWZDKD
2. Ибрагимов Р.А., Пименов С.И. Влияние механохимической активации на особенности процессов гидратации цемента // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 2(62). С. 3–12. DOI: <https://doi.org/10.5862/MCE.62.1>
3. Гурьянов Г.А., Клименко Е.А., Васильева О.Ю. Улучшение процесса приготовления и качества бетона на основе анализа способов активации цемента // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2015. № 1. С. 23–41. EDN: TXOYOZ
4. Панченко А.И., Абрамов М.А., Мурашов А.О. Влияние способа активации портландцемента на свойства цементного камня и мелкозернистого бетона // Научный журнал строительства и архитектуры. 2023. № 2(70). С. 47–55. DOI: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.70.2.004>
5. Шахов С.А., Рогова Е.В. Влияние механической активации на прочностные свойства зольного цемента // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 2(686). С. 25–31. EDN: VVADNL
6. Морозова Н.Н., Кайс Х.А. Повышение реакционной способности цеолитсодержащих цементов механической активацией // Вестник Технологического университета. 2016. Т. 19, № 14. С. 79–82. EDN: WJCZSX
7. Большаков В.И., Елисеева М.А., Щербак С.А. Контактная прочность механоактивированных мелкозернистых бетонов из доменных гранулированных шлаков // Наука та прогрес транспорту. 2014. № 5(53). С. 138–149. EDN: TACRMT
8. Косач А.Ф., Кузнецова И.Н., Ращупкина М.А., Педун Г.А. Цементный камень на кварцезолоцементном вяжущем // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2022. Т. 14, № 2. С. 83–88. DOI: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-2-83-88>

9. Морозова М.В., Айзенштадт А.М., Акулова М.В., Фролова М.А. Фазово-структурная гетерогенность и активность поверхности порошков полиминеральных песков // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2022. Т. 14, № 2. С. 89–95. DOI: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-2-89-95>
10. Самченко С.В., Османов А.Б., Абрамов М.А. Активация кварцевого песка в дезинтеграторной установке // Техника и технология силикатов. 2023. Т. 30, № 4. С. 316–327. EDN: KWAYNT
11. Кузьмина В.П. Эффективность применения механоактивации при производстве сухих строительных смесей // Сухие строительные смеси. 2011. № 2. С. 32–34. EDN: TLPVAN
12. Косач А.Ф., Кузнецова И.Н., Педун Г.А., Прежин С.Е. Применение активированных кварцевых отходов на физико-механические свойства цементного камня // Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Современные инженерные проблемы ключевых отраслей промышленности» III Международного Косыгинского Форума «Современные задачи инженерных наук» (20–21 октября 2021 г.). Т. 2. Москва: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2021. С. 175–186. EDN: JWQBRU
13. Кузнецова И.Н., Курбанова Р.Б. Основные свойства пенобетона на кварцецементном вяжущем // Вестник Югорского государственного университета. 2022. № 3(66). С. 63–67. DOI: <https://doi.org/10.18822/byusu20220363-67>
14. Загороднюк Л.Х., Рахимбаев Ш.М., Сумской Д.А., Рыжих В.Д. Особенности процессов гидратации вяжущих композиций с использованием отходов вспученного перлитового песка // Вестник Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова. 2020. № 11. С. 75–88. DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-11-75-88>
15. Кравченко И.Н., Ерофеев М.Н., Величко С.А. и др. Аэроударный способ механохимической активации вторичного сырья в производстве строительных материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2023. № 7. С. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2023-0-7-27-34>
16. Сайдумов М.С., Джандаров А.Ш., Муртазаева Т.С.-А. Особенности технологии получения смешанных вяжущих на основе мелких некондиционных песков // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2020. Т. 16. № 2(20). С. 66–71. DOI: <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2020.17.86.006>
17. Шаранова А.В., Ленькова Д.А., Панфилова А.Д. Влияние механической активации исходных компонентов на механические свойства бетонной смеси // Актуальные проблемы строительства: материалы 71-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в 3 ч., Санкт-Петербург, 04–06 апреля 2018 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. С. 108–114. EDN: OCEZLW
18. Шаранова А.В., Дмитриева М.А., Захаров А.А. Формирование свойств наномодифицированных бетонов // III Международная конференция молодых ученых по современным проблемам материалов и конструкций, Улан-Удэ, 24–28 августа 2019 г.: сборник статей. Улан-Удэ: Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова, 2019. С. 121–126. EDN: VCBQSI
19. Kada-Benameur H., Wirquin E., Duthoit B. Determination of apparent activation energy of concrete by isothermal calorimetry // Cement and Concrete Research. 2000. Vol. 30, № 2. P. 301–305. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00250-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00250-1)
20. Дмитриева М.А., Лейцин В.Н., Шаранова А.В. Оценка макрокинетических параметров процесса гидратации цемента по результатам термомеханических испытаний // Современные строительные материалы и технологии: сборник научных статей II международной конференции. Вып. 2. Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2020. С. 7–15. EDN: QKBDQA

REFERENCES

1. Alfimova N.I., Kalatozi V.V., Karatsupa S.V. Vishnevskaya I.A., Sheichenko M.S. Mechanical activation as a way of improving the efficiency use of raw materials of different genesis in building materials science. *Bulletin of Belgorod state technological university named after V. G. Shukhov*, 2016, no. 6, pp. 85–89. (In Russ.).
2. Ibragimov R.A., Pimenov S.I. Influence of mechanochemical activation on the cement hydration features. *Magazine of Civil Engineering*, 2016, no. 2(62), pp. 3–12. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.5862/MCE.62.1>
3. Guryanov G.A., Klimenko E.A., Vasilyeva O.Yu. Improving the concrete preparation process and its quality on the basis of activation methods analysis of cement. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2015, no. 1, pp. 23–41. (In Russ.).

4. Panchenko A.I., Abramov M.A., Murashov A.O. Impact of the portland cement activation method on the properties of cement stone and fine-grained concrete. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*, 2023, no. 2(70), pp. 47–55. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.70.2.004>
5. Shakhov S.A., Rogova E.V. Influences of the mechanical activating of ash of sediment of waste water treatment on activity of cement. *News of higher educational institutions. Construction*, 2016, no. 2(686), pp. 25–31. (In Russ.).
6. Morozova N.N., Kays K.H.A. Increasing the reactivity of zeolite-containing cements by mechanical activation. *Herald of the Technological University*, 2016, vol. 19, no. 14, pp. 79–82. (In Russ.).
7. Bolshakov V.I., Yeliseieva M.A., Shcherbak S.A. Contact strength of mechanoactivated fine concretes from granulated blast-furnace slags. *Science and progress in transport*, 2014, no. 5(53), pp. 138–149. (In Russ.).
8. Kosach A.F., Kuznetsova I.N., Rashchupkina M.A., Pedun G.A. Cement stone on quartz-ash-cement binder. *Nanotechnology in construction: scientific online journal*, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 83–88. DOI: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-2-83-88>
9. Morozova M.V., Ayzenshtadt A.M., Akulova M.V., Frolova M.A. Phase-structural heterogeneity and activity of the surface of polymineral sand powders. *Nanotechnology in construction: scientific online journal*, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 89–95. DOI: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-2-89-95>
10. Samchenko S.V., Osmanov A.B., Abramov M.A. Activation of quartz sand in a disintegrator plant. *Technique and technology of silicates*, 2023, vol. 30, no. 4, pp. 316–327. (In Russ.).
11. Kuz'mina V.P. Efficiency of mechanical activation in the production of dry building mixtures. *Dry building mixtures*, 2011, no. 2, pp. 32–34. (In Russ.).
12. Kosach A.F., Kuznetsova I.N., Pedun G.A., Prezhin S.Ye. Application of activated quartz waste on the physical and mechanical properties of cement stone. Proceedings of the International Scientific and Technical Symposium “Modern engineering problems of key industries” the III International Kosygin Forum “Modern tasks of engineering sciences”, Moscow, October 20–21, 2021. Vol. 2. Moscow, A.N. Kosygin Russian State University, 2021, pp. 175–186. (In Russ.).
13. Kuznetsova I.N., Kurbanova R.B. Basic properties of foam concrete on quartz cement binder. *Yugra State University Bulletin*, 2022, no. 3(66), pp. 63–67. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18822/byusu20220363-67>
14. Zagorodnyuk L.Kh., Rakhimbaev S.M., Sums koy D.A., Ryzhikh V.D. Features of the processes of hydration of binding compositions using waste of expanded perlite sand. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2020, no. 11, pp. 75–88. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-11-75-88>
15. Kravchenko I.N., Yerofeyev M.N., Velichko S.A. et al. Air impact method of mechanochemical activation of secondary raw materials in the production of building materials. *All materials. Encyclopedic reference book*, 2023, no. 7, pp. 27–34. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2023-0-7-27-34>
16. Saidumov M.S., Dzhandarov A.Sh., Murtazaeva T.S.-A. Features of technology for producing mixed binders based on small non-conditional sands. *Herald of GSTOU. Technical Sciences*, 2020, vol. 16, no. 2(20), pp. 66–71. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2020.17.86.006>
17. Sharanova A.V., Len'kova D.A., Panfilova A.D. The influence of mechanical activation of the initial components on the mechanical properties of concrete mixture. *Actual problems of construction: proceedings of the 71st All-Russian scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists in 3 hours, St. Petersburg, April 04–06, 2018*. St. Petersburg, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2018, pp. 108–114. (In Russ.).
18. Sharanova A.V., Dmitrieva M.A., Zakharov A.A. Formation of the properties of nano-modified concretes. *III International conference of young scientists on modern problems of materials and structures: proceedings, Ulan-Ude, August 24–28, 2019*. Ulan-Ude, Buryat State University named after Dorzhi Banzarov, 2019, pp. 121–126. (In Russ.).
19. Kada-Benameur H., Wirquin E., Duthoit B. Determination of apparent activation energy of concrete by isothermal calorimetry. *Cement and Concrete Research*, 2000, vol. 30, no. 2, pp. 301–305. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00250-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00250-1)
20. Dmitrieva M.A., Leitsin V.N., Sharanova A.V. Evaluation of macrokinetic parameters of the cement hydration process based on the results of thermomechanical tests. *Advanced construction materials and technologies: proceedings of II international conference*. Vol. 2. Kaliningrad, Immanuel Kant Baltic Federal University, 2020, pp. 7–15. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Пузатова Анастасия Вячеславовна – зав. лабораторией строительных материалов, старший преподаватель образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий», Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (Калининград, Российская Федерация)

✉ a.v.puzatova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3798-4969>

Anastasiia V. Puzatova, Head Laboratory of Construction Materials, Senior Lecturer of the Educational and Scientific Cluster "Institute of High Technologies", Immanuel Kant Baltic Federal University (Kaliningrad, Russian Federation)

Дмитриева Мария Александровна – доктор физико-математических наук, профессор образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий», Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (Калининград, Российская Федерация)

✉ ADmitrieva@kantiana.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9593-8653>

Maria A. Dmitrieva – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Educational and Scientific Cluster "Institute of High Technologies", Immanuel Kant Baltic Federal University (Kaliningrad, Russian Federation)

Лейцин Владимир Нояхович – доктор физико-математических наук, профессор образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий», Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (Калининград, Российская Федерация)

✉ VLeitsin@kantiana.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6140-256X>

Vladimir N. Leitsin – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Educational and Scientific Cluster Institute of High Technologies, Immanuel Kant Baltic Federal University (Kaliningrad, Russian Federation)

Статья поступила в редакцию / Received: 11.07.2024.

Доработана после рецензирования / Revised: 30.07.2024.

Принята к публикации / Accepted: 09.12.2024.