

Влияние временного фактора на гидравлическую активность механоактивированного сапонитсодержащего порошка

Марина Владимировна Морозова* , Мария Аркадьевна Фролова 

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: m.morozova@narfu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматривается проблема развития транспортной инфраструктуры на архипелаге Соловецкий и предлагается решение по снижению затрат на изготовление железобетонных плит для дорожного покрытия. Предлагается использовать сапонитсодержащий отход (ССО) горно-обогатительного комбината АО «Севералмаз» в качестве минеральной добавки в бетоны. Исследования показали, что механоактивированный сапонитсодержащий порошок (МСП) улучшает эксплуатационные характеристики бетона и снижает расход вяжущего. Использование МСП позволяет решить проблему утилизации отходов и снизить экологический ущерб. **Целью работы** является оценка влияния временного фактора на гидравлическую активность МСП, так как активность добавки может изменяться при длительном хранении. Известно, что степень активности минеральных компонентов принято оценивать по количеству поглощенных из насыщенного известкового раствора ионов Ca^{2+} . Для отслеживания изменения содержания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ во времени в ходе протекания гидравлической реакции существует ряд прямых аналитических способов. Данная методика, основанная на измерении потенциала ион-селективного электрода, в полной мере подходит для контроля гидравлической активности МСП. **Методы и материалы.** В качестве основного материала для проведения исследований использовали сапонитсодержащий отход, который был выделен, высушен и диспергирован. Таким образом, был получен механоактивированный сапонитсодержащий порошок (МСП). Контроль за степенью измельчения полученных высокодисперсных проб МСП осуществляли по величине удельной поверхности ($S_{\text{уд}}$, $\text{м}^2/\text{кг}$). Для выполнения потенциометрического анализа использовалась электродная система, состоящая из измерительного электрода с функцией определения ионов кальция (pCa) и электрода сравнения. В рамках подготовки к эксперименту кальций-селективный электрод модели «Элит-041» выдерживали в течение трех дней в растворе хлорида кальция с концентрацией 0,01 моль/л. После этого электрод промывали дистиллированной водой и калибровали по растворам с концентрациями (C_{Ca}), составляющими 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} и 10^{-5} моль/л, для которых $\text{pCa} = 1 \div 5$. Для исследования сорбционной способности был приготовлен раствор извести с концентрацией 0,015 моль/л, а также суспензия из проб высокодисперсного минерального сапонитсодержащего порошка. В полученную суспензию последовательно дозатором вводили раствор извести объемом по 0,2 мл, при этом осуществляя измерение электродвижущей силы (потенциала) системы при непрерывном перемешивании. На основании полученных значений потенциалов (мВ) проводили расчет концентрации ионов кальция ($C_{\text{факт}}^{\text{Ca}}$) в объемной фазе суспензии с применением заранее установленной калибровочной зависимости. Далее, используя алгоритм расчета параметров активности порошков по данным потенциометрии, определили максимальное количество поглощенного гидроксида кальция (ΔC_{CaO}) как разницу между значениями $C_{\text{теор}}^{\text{Ca}}$ и $C_{\text{факт}}^{\text{Ca}}$ и коэффициент гидравлической активности ($\Gamma_{\infty} = \ln^3 \sqrt{\Delta C_{\text{CaO}}}$). **Результаты и обсуждение.** Полученный механоактивированный сапонитсодержащий порошок при разной продолжительности помола имел удельную поверхность: 196 $\text{м}^2/\text{кг}$ (10 мин), 644 $\text{м}^2/\text{кг}$ (30 мин), 1209 $\text{м}^2/\text{кг}$ (60 мин), 1428 $\text{м}^2/\text{кг}$ (90 мин). Построенная предварительно калибровочная зависимость потенциала электродной пары от величины pCa характеризуется линейным уравнением: $E = -23,23\text{pCa} + 520,35$. Установлено, что при добавлении известкового раствора в суспензию наблюдается рост ЭДС из-за сорбции ионов кальция механоактивированным сапонитсодержащим порошком. После достижения порогового объема раствора $\text{Ca}(\text{OH})_2$ потенциал стабилизируется. При дальнейшем увеличении концентрации ионов кальция, когда прекращается их взаимодействие с частицами МСП, значение E снова возрастает. Далее для всех серий эксперимента были получены зависимости, отличие которых заключается лишь в количественных характеристиках функциональных параметров. Начальное значение потенциала электродной пары характеризует фоновую концентрацию ионов кальция, определяемую их остаточным содержанием в воде и/или МСП. Полученные функциональные зависимости $C_{\text{факт}}^{\text{Ca}} = f(C_{\text{теор}}^{\text{Ca}})$ для исследуемых проб позволили определить пороговые значения концентрации ионов кальция в растворе, превышение которых создает их избыток в реакционной среде. Построенная функциональная зависимость $\Gamma_{\infty} = f(S_{\text{уд}})$ показала, что Γ_{∞} достигает своего максимального значения уже при удельной по-

верхности более 600 м²/кг (30 мин помола). Поскольку помол 10 минут слабо влияет на удельную поверхность сапонитового порошка, что отражается на величине коэффициента гидравлической активности МСП, то была рассмотрена зависимость $\Gamma_{\infty} = f(S_{уд})$ для помола более 10 минут. Экстраполяция зависимости на удельную поверхность порошка 300 м²/кг (получается промышленным способом) дает значение $\Gamma_{\infty} = 0,772$, что на 5% ниже максимального значения в экспериментах. Для изучения влияния времени на гидравлическую активность использовали порошок после 60-минутного помола ($S_{уд} = 1209$ м²/кг), исходя из предположения, что высокая удельная поверхность усилит изменение реакционной способности при хранении. Экспериментальные характеристики (потенциал электродной пары) измеряли через 7, 14 и 30 суток выдержки. Полученные результаты показали, что при хранении механоактивированного сапонитсодержащего порошка происходит уменьшение его удельной поверхности из-за конгломерации глинистых частиц. Полученные данные, по нашему мнению, констатируют факт сохранения длительное (30-суточное) время достаточно высокой гидравлической активности механоактивированных сапонитсодержащих порошков в широком диапазоне варьирования их удельной поверхности (300–1200 м²/кг). **Заключение.** Показано, что потенциометрический метод определения сорбционной емкости к оксиду кальция эффективен как экспресс-способ для оценки гидравлической активности механоактивированного сапонитсодержащего порошка и влияния времени. При этом гидравлическая активность механоактивированных порошков линейно связана с удельной поверхностью (300–1200 м²/кг), причем характер этой связи описывается линейным уравнением с высоким значением коэффициента достоверности аппроксимации (0,99). МСП сохраняют гидравлическую активность при хранении в естественных условиях 30 суток с уменьшением величины гидравлической активности на 4,1%.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сапонитсодержащий порошок, механическое измельчение, величина удельной поверхности, гидравлическая активность, оксид кальция, концентрация гидроксида кальция, потенциал электродной пары

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-13-20013 «Грунтобетоны на основе органоминерального реактивного связующего для усиления исторических дорожных конструкций Соловецкого архипелага».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Морозова М.В., Фролова М.А. Влияние временного фактора на гидравлическую активность механоактивированного сапонитсодержащего порошка. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025; 17(3):244–253. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-3-244-253>. – EDN: AFTMHY.

Effect of the time factor on the hydraulic activity of mechanically activated saponin-containing powder

Marina V. Morozova* , Maria A. Frolova 

"Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov", Arkhangelsk, Russia

* Corresponding author: e-mail: m.morozova@narfu.ru

ABSTRACT

Introduction. The article examines the problem of the development of transport infrastructure in the Solovetsky archipelago and proposes a solution to reduce the cost of manufacturing reinforced concrete slabs for the road surface. It is proposed to use saponite-containing waste (SCW) of the mining and processing plant JSC Severalmaz as a mineral additive in concrete. Studies have shown that mechanically activated saponite-containing powder (MSP) improves concrete performance and reduces binder consumption. The use of MSP makes it possible to solve the problem of waste disposal and reduce environmental damage. **The purpose of the work** is to assess the effect of the time factor on the hydraulic activity of the mechanically activated saponite-containing powder, since the activity of the additive may change during long-term storage. It is known that the degree of activity of mineral components is usually estimated by the amount of Ca²⁺ ions absorbed from a saturated lime solution. A number of direct analytical methods are available to monitor the change in Ca(OH)₂ content over time during the course of the hydraulic reaction. This technique, based on the measurement of the potential of the ion-selective electrode, is fully suitable for monitoring the hydraulic activity of the MSP. **Methods and Materials.** Saponite-containing waste was used as the main material for the studies, which was isolated, dried and dispersed. A mechanically activated saponite-containing powder was thus obtained. Control of the degree of grinding of the obtained finely divided MSP samples was carried out according to the specific surface area (S_{sp} , m²/kg). To perform potentiometric analysis, an electrode system consisting of a measuring electrode with a calcium ion detection function (pCa) and a reference electrode was used. In preparation for the experiment, the calcium selective electrode of the Elite-041 model was kept for three days in a calcium chloride solution with a concentration of 0.01 mol/L. The electrode was then washed with distilled water and calibrated to solutions with concentrations (C_{Ca}) of 10⁻¹, 10⁻², 10⁻³, 10⁻⁴ and 10⁻⁵ mol/L, for which pCa = 1–5. To study the sorption capacity, a lime solution with a concentration of 0.015 mol/l was prepared, as well as a suspension from samples

of fine mineral saponite-containing powder. A solution of lime with a volume of 0.2 ml was successively added to the resulting suspension by a doser, while measuring the electromotive force (potential) of the system with continuous stirring. Based on the obtained potential values (mV), the concentration of calcium ions ($C_{\text{fact}}^{\text{Ca}}$) in the bulk phase of the suspension was calculated using a predetermined calibration relationship. Further, using the algorithm for calculating the activity parameters of powders, according to potentiometry data, the maximum amount of absorbed calcium hydroxide (ΔC_{CaO}) was determined as the difference between the $C_{\text{teor}}^{\text{Ca}}$ and $C_{\text{fact}}^{\text{Ca}}$, and the hydraulic activity coefficient ($G_{\infty} = \ln^3 \sqrt{\Delta C_{\text{CaO}}}$). **Results and Discussion.** The resulting mechanically activated saponite-containing powder had a specific surface area of 196 m²/kg (10 min), 644 m²/kg (30 min), 1209 m²/kg (60 min), 1428 m²/kg (90 min) at different milling times. The preliminary calibration dependence of the potential of the electrode pair on the pCa value is characterized by the linear equation: $E = -23,23\text{pCa} + 520,35$. It was found that when adding a lime solution to the suspension, an increase in EMF is observed due to the sorption of calcium ions by a mechanically activated saponite-containing powder. After reaching the threshold volume of the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solution, the potential stabilizes. With a further increase in the concentration of calcium ions, when their interaction with the MSP particles ceases, the E value increases again. Further, dependencies were obtained for all batches of the experiment, the difference of which lies only in the quantitative characteristics of the functional parameters. Initial value of electrode pair potential characterizes background concentration of calcium ions determined by their residual content in water and/or MSP. The obtained functional relationships of the $C_{\text{fact}}^{\text{Ca}} = f(C_{\text{teor}}^{\text{Ca}})$ for the test samples made it possible to determine the threshold values of the concentration of calcium ions in the solution, the excess of which creates their excess in the reaction medium. The built functional dependence of the $G_{\infty} = f(S_{\text{sp}})$, showed that the G_{∞} reaches its maximum value already at a specific surface area of more than 600 m²/kg (30 minutes of grinding). Since the grinding of 10 minutes has little effect on the specific surface area of the saponite powder, which affects the value of the hydraulic activity coefficient of the MSP, the dependence of $G_{\infty} = f(S_{\text{sp}})$ for grinding more than 10 minutes was considered. Extrapolation of the dependence on the specific surface area of the powder to 300 m²/kg (obtained industrially) gives a value of $G_{\infty} = 0.772$, which is 5% lower than the maximum value in the experiments. To study the effect of time on hydraulic activity, powder after 60 minutes grinding ($S_{\text{sp}} = 1209 \text{ m}^2/\text{kg}$) was used, assuming that a high specific surface area would enhance the change in storage reactivity. Experimental characteristics (electrode pair potential) were measured after 7, 14 and 30 days of exposure. The obtained results showed that during storage of mechanically activated saponite-containing powder, its specific surface area decreases due to conglomeration of clay particles. The obtained data, in our opinion, state the fact that the hydraulic activity of mechanically activated saponite-containing powders remains quite high for a long time (30-day) in a wide range of variation of their specific surface area (300–1200 m²/kg). **Conclusion.** It is shown that potentiometric method of determination of sorption capacity to calcium oxide is effective as express method for evaluation of hydraulic activity of mechanically activated saponite-containing powder and influence of time. At the same time hydraulic activity of mechanically activated powders is linearly related to specific surface (300–1200 m²/kg), besides, nature of this connection is described by linear equation with high value of approximation reliability factor (0.99). MSP retain hydraulic activity during natural storage for 30 days with a decrease in hydraulic activity by 4.1%.

KEYWORDS: saponite-containing powder, mechanical grinding, specific surface area, hydraulic activity, calcium oxide, calcium hydroxide concentration, electrode pair potential

ACKNOWLEDGMENTS: The research was carried out with the financial support of RCF within the framework of the scientific project 23-13-20013 "Soil concrete based on an organomineral reactive binder to strengthen the historical road structures of the Solovetsky Archipelago".

FOR CITATION:

Morozova M.V., Frolova M.A. Effect of the time factor on the hydraulic activity of mechanically activated saponin-containing powder. *Nanotechnologies in Construction*. 2025;17(3):244–253. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-3-244-253>. – EDN: AFTMHY.

ВВЕДЕНИЕ

Особое значение при создании благоприятной городской среды на архипелаге Соловецкий имеет развитие транспортной инфраструктуры населенного пункта. Комплексное обновление дорожной сети поселка включает как создание новых объектов, так и ремонт существующих трасс с грунтовым и переходным покрытием (рис. 1). Последнее представлено в виде природного камня и железобетонных плит, общей протяженностью 2,5 км. Устройство такого дорожного полотна является одним из более быстрых способов создания прочного и структурно устойчивого покрытия [1–5].

Однако изготовление железобетонных плит и сопутствующих строительных материалов с последующей их доставкой на архипелаг — весьма материалоемкая и трудоемкая задача, что делает этот процесс экономически нецелесообразным.

Известно, что себестоимость изготовления бетонных композитов связана с использованием вяжущих, заполнителей/наполнителей и различных химических добавок, регулирующих свойства конечного продукта. Поэтому снижение стоимости этих составляющих является одним из рычагов, который может компенсировать затраты на трудоемкость и получить суммарный экономический эффект. Кроме того, важной современной составляющей при получении



Рис. 1. Состояние покрытия дорог пос. Соловецкий (<https://dorogi-onf.ru/city/2097/>)

строительных материалов является использование ресурсосберегающих технологий, включающих эффективное применение отходов производств с разным химическим составом и структурой, позволяющих снизить затраты [6–10].

В строительной отрасли устойчивый интерес продолжает проявляться к изделиям и конструкциям из бетона, так как для его изготовления из сырьевых компонентов (цемент, песок, добавки) требуется минимальное потребление энергии. Кроме того, производство бетонной смеси обладает широкими возможностями для утилизации вторичных материальных ресурсов (отходов производств) [11–12]. Так, проведенные ранее исследования показали эффективность применения в вяжущих композициях гидратационного типа твердения тонкомолотых дисперсных минеральных добавок. Классическим примером такого сырья является зола-уноса, тонкомолотые шлаки и микрокремнезем [13–14]. Однако для каждого региона России в качестве такой добавки могут быть использованы местные отходы производств, к примеру, глиноземсодержащие алюминиевые шлаки Донбасса [15], техногенное сырье энергетических и металлургических предприятий [16], тонкомолотый наполнитель на основе метакрилатов в Челябинске [17] или шлаковых отходов Томска. Для Архангельской области это сапонитсодержащий отход (ССО) горно-обогатительного комбината АО «Севералмаз», который складывается в большом объеме (до 4 млн. тонн ежегодно) в пруды-отстойники. Масштабная сапонитизация алмазодобывающей руды [18] затрудняет использование технологической воды в системе оборотного водоснабжения фабрики [19–

20] и вынуждает постоянно увеличивать площади, отводимые под отвалы вскрышных пород.

Проведенные ранее исследования [21] показали эффективность применения ССО в форме механоактивированного сапонитсодержащего порошка (МСП) в качестве минеральной добавки в бетоны, улучшающей эксплуатационные характеристики композита и снижающей расход самого дорогого компонента – вяжущего. При этом для активации данного компонента используется механическое диспергирование до удельной поверхности, сравнимой с удельной поверхностью цемента [22]. В этом случае сапонитовое сырье трансформируется в высокоактивный минеральный порошок, проявляющий: водосорбционные свойства, регулирующие водоцементное отношение смеси; пуццолановую активность с образованием гидросиликатов группы тоберморита [21]. Последние образуются в поровом пространстве композита при его твердении и обеспечивают получение прочной структуры бетона, улучшая его эксплуатационные характеристики.

Таким образом, использование отходов Архангельской алмаздобывающей промышленности в качестве сырьевой базы для получения высокоактивного минерального сапонитсодержащего порошка позволяет комплексно решить проблему повышения эффективности и качества строительного производства, а также снизить экологический ущерб, наносимый окружающей среде региона.

В настоящее время выбор сырья для получения наиболее эффективных модифицирующих добавок основывается на результатах исследований процессов гидратации, которые протекают в системе «до-

бавка-цементное вяжущее» при ее твердении и способствуют образованию и развитию кристаллических новообразований [23–25]. В этом плане механизм действия МСП изучен [21]. Установлено, что его положительное влияние на свойства цементных композиций во многом зависит от величины активности добавки и ее удельной поверхности. Однако эти параметры могут изменяться в случае длительного хранения МСП и тем самым ограничить срок годности продукции и дальность ее транспортировки.

Поэтому целью данной работы является оценка влияния временного фактора на гидравлическую активность механоактивированного сапонитсодержащего порошка.

Известно, что степень активности минеральных компонентов принято оценивать по количеству поглощенных из насыщенного известкового раствора ионов Ca^{2+} . Для отслеживания изменения содержания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ во времени в ходе протекания гидравлической реакции существует ряд прямых аналитических способов. Так, в работах [26–27] показана применимость потенциометрического метода анализа с использованием ион-селективного электрода с рСа-функцией для оценки гидравлической активности высокодисперсных материалов. Данная методика, основанная на измерении потенциала ион-селективного электрода, в полной мере подходит для контроля гидравлической активности МСП и является весьма эффективной с точки зрения экспрессности и трудоемкости.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве основного материала для проведения исследований использовали сапонитсодержащий отход Ломоносовского горно-обогатительного комбината АО «Севералмаз», который был выделен, высушен и диспергирован. Таким образом, был получен механоактивированный сапонитсодержащий порошок (МСП), при этом технологический передел породы включал следующие этапы:

I – выделение ССО из суспензии оборотной воды путем электролитной коагуляции;

II – доведение сгущенного осадка до остаточной влажности не более 10% с помощью сушильного шкафа при температуре 105 °С;

III – сухой помол материала до требуемой степени дисперсности на планетарной шаровой мельнице Retsch PM100. Опытным путем были подобраны оптимальные режимные параметры диспергирования: скорость вращения ротора мельницы 420 мин⁻¹, количество размольных тел – 20 шт. (карбидвольфрамовые шары); время помола 10, 30, 60 и 90 минут.

Контроль за степенью измельчения полученных высокодисперсных проб МСП осуществляли по ве-

личине удельной поверхности ($S_{\text{уд}}$, м²/кг) на автоматическом многофункциональном приборе ПСХ-10М методом газопроницаемости Козени и Кармана.

Для выполнения потенциометрического анализа использовалась электродная система, состоящая из измерительного электрода с функцией определения ионов кальция (рСа) и электрода сравнения. Данная система была подключена к иономеру модели Эксперт-001-3.0.1. Electrodes помещались в стеклянную цилиндрическую емкость объемом 100 мл. Для обеспечения равномерного распределения компонентов реакционной смеси в анализируемом объеме применялась магнитная мешалка. Все эксперименты проводились в условиях контролируемой температуры, которая поддерживалась на уровне 20 °С с отклонением ± 2 °С.

В рамках подготовки к эксперименту кальций-селективный электрод модели «Элит-041» выдерживали в течение трех дней в растворе хлорида кальция с концентрацией 0,01 моль/л. После этого электрод промывали дистиллированной водой и калибровали с использованием стандартных растворов хлорида кальция. Калибровка проводилась по растворам с концентрациями (C_{Ca}), составляющими 10⁻¹, 10⁻², 10⁻³, 10⁻⁴ и 10⁻⁵ моль/л, для которых рСа = 1÷5.

Для исследования сорбционной способности был приготовлен раствор извести с концентрацией 0,015 моль/л при температуре 20 °С, а также суспензия из проб высокодисперсного минерального сапонитсодержащего порошка (навеска 0,5 г в 80 мл дистиллированной воды). В полученную суспензию (практически сразу после приготовления) последовательно дозатором вводили раствор извести объемом по 0,2 мл, при этом осуществляя измерение электродвижущей силы (потенциала) системы при непрерывном перемешивании. На основании полученных значений потенциалов (мВ) проводили расчет концентрации ионов кальция ($C_{\text{факт}}^{\text{Ca}}$) в объемной фазе суспензии с применением заранее установленной калибровочной зависимости.

Аналогичные эксперименты проводили после выдержки МСП (в сухом состоянии в полиэтиленовой емкости) в течение 7, 14 и 30 дней. Далее используя алгоритм расчета параметров активности порошков по данным потенциометрии, представленным в работах [26, 27], определили максимальное количество поглощенного гидроксида кальция (ΔC_{CaO}) как разницу между значениями $C_{\text{теор}}^{\text{Ca}}$ и $C_{\text{факт}}^{\text{Ca}}$ и коэффициент гидравлической активности ($\Gamma_{\infty} = \ln^3 \sqrt{\Delta C_{\text{CaO}}}$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выделенный по вышеописанной технологии механоактивированный сапонитсодержащий порошок с разной продолжительностью помола (10÷90 мин)

был охарактеризован по величине удельной поверхности: $S_{уд}^{10} = 196 \text{ м}^2/\text{кг}$; $S_{уд}^{30} = 644 \text{ м}^2/\text{кг}$; $S_{уд}^{60} = 1209 \text{ м}^2/\text{кг}$; $S_{уд}^{90} = 1428 \text{ м}^2/\text{кг}$ (надстрочный символ соответствует продолжительности помола).

На рис. 2 представлена калибровочная зависимость потенциала (ЭДС) используемой электродной пары от величины pCa . Математическое выражение характеризуется прямой линией и может быть представлено следующим уравнением: $E = -23,23pCa + 520,35$

Значение углового коэффициента представленного выражения соответствует теоретическому значению крутизны градуировочной характеристики электрода, что свидетельствует о корректности полученных данных.

На рис. 3 представлена экспериментальная зависимость значения потенциала электродной пары (E) от объема вводимого в реакционную среду раствора извести. Установлено, что добавление известкового

раствора в суспензию сопровождается ростом ЭДС, который связан с процессом сорбции ионов кальция механоактивированным сапонитсодержащим порошком. При этом зафиксировано, что при добавлении некоторого порогового объема ($V_{изв.}$, мл) раствора $Ca(OH)_2$ электродный потенциал практически стабилизируется. Дальнейшее увеличение концентрации ионов кальция в анализируемом растворе (при котором взаимодействие анализируемых ионов с частицами МСП прекращается) приводит к повторному росту значения E .

Следует отметить, что аналогичные зависимости получены для всех серий эксперимента, отличие которых заключается лишь в количественных характеристиках функциональных параметров. При этом значение потенциала электродной пары в момент начала эксперимента (до добавления раствора гидроксида кальция) характеризует фоновую концентрацию ионов кальция, которая определяется

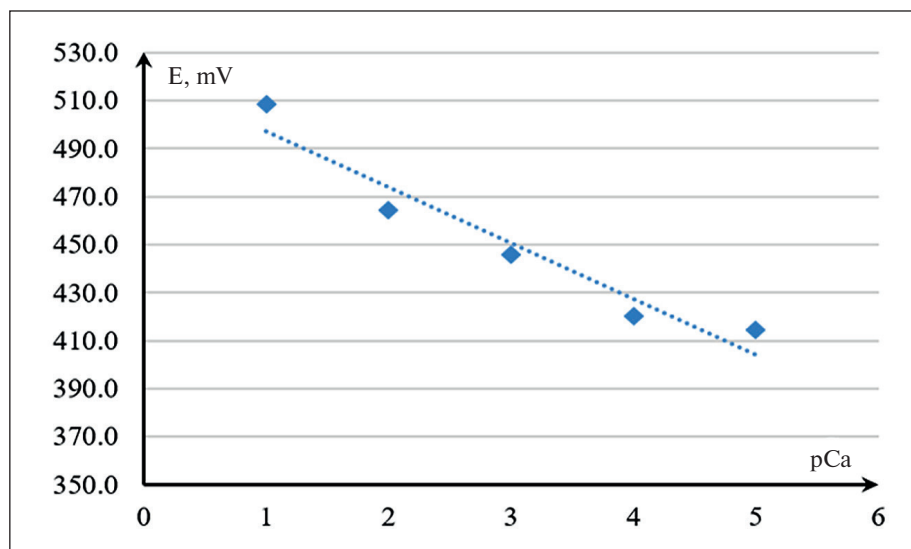


Рис. 2. Калибровочная зависимость вида $E = f(pCa)$

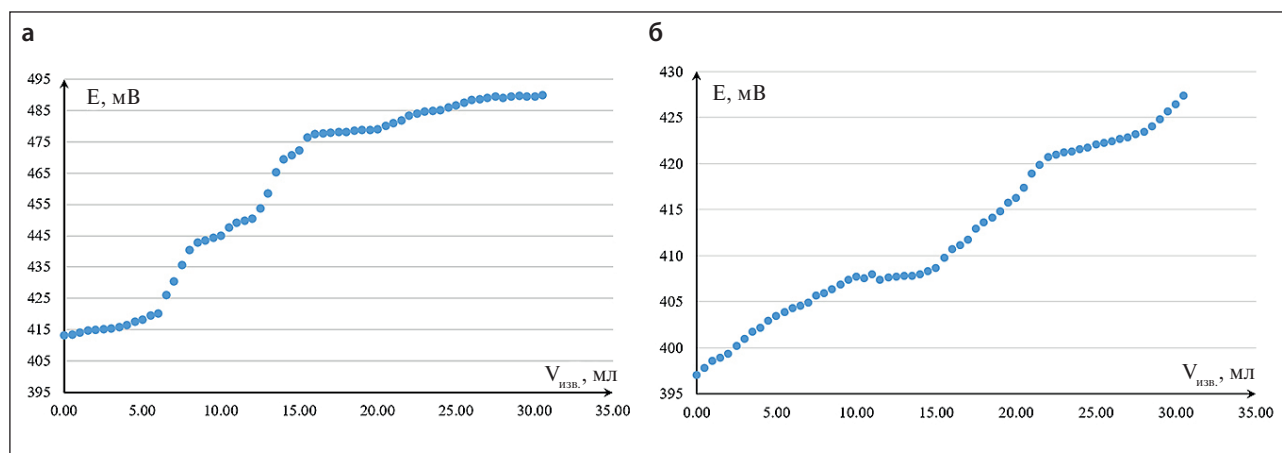


Рис. 3. Потенциал электродной пары при добавлении раствора $Ca(OH)_2$ в суспензию МСП: а – время помола 10 мин; б – время помола 60 мин.

их остаточным содержанием в используемой H_2O и (или) МСП.

На рис. 4 для примера представлены функциональные зависимости $C_{\text{факт}}^{Ca} = f(C_{\text{теор}}^{Ca})$ для исследуемых МСП, рассчитанные по данным потенциометрических измерений. Аналогичные данные были получены и для двух других фракций порошка.

Полученные результаты (рис. 4) позволяют определить пороговые значения концентрации ионов кальция в растворе, увеличение которой приводит к их избытку в реакционной среде.

Отношение заданной концентрации ($C_{\text{теор}}^{Ca}$) к определяемой концентрации ионов кальция в суспензии ($C_{\text{факт}}^{Ca}$) в области пороговых значений данных параметров характеризует степень активности испытуемого образца МСП по отношению к Ca^{2+} . Полученные результаты и расчетные значения коэффициента гидравлической активности представлены в табл. 1.

Функциональная зависимость $\Gamma_{\infty} = f(S_{\text{уд}})$, приведенная на рис. 5, показывает, что Γ_{∞} достигает своего максимального значения уже при удельной поверхности более $600 \text{ м}^2/\text{кг}$ (30 мин помола).

Учитывая тот факт, что продолжительность помола 10 мин практически мало влияет на удельную поверхность сапонитового порошка, что отражается на величине коэффициента гидравлической активности МСП, нами отдельно рассмотрена зависи-

мость $\Gamma_{\infty} = f(S_{\text{уд}})$ для продолжительности помола сырьевого материала более 10 мин (рис. 6).

Экстраполяция полученной зависимости (рис. 6) на удельную поверхность МСП, равную $300 \text{ м}^2/\text{кг}$ (данное значение этой характеристики имеет МСП, получаемый промышленным способом в условиях реализации технологического процесса получения минерального сапонитсодержащего порошка с использованием активатора (двухстадийный помол на молотковой дробилке МПС 300Л и шаровой мельнице – помольный комплекс «Активатор С1000» [28]), значение $\Gamma_{\infty} = 0,772$. Данное значение коэффициента гидравлической активности ожидаемо близко к максимальному, полученному в данных сериях эксперимента (снижается всего на 5%).

Для уточнения влияния временного фактора на величину коэффициента гидравлической активности МСП использовали порошок, полученный после 60 минутного помола ($S_{\text{уд}} = 1209 \text{ м}^2/\text{кг}$), допуская, что высокое значение удельной поверхности порошка более активно будет способствовать изменению его реакционной способности при длительном хранении. Определение экспериментальных характеристик (потенциала электродной пары) и обработку полученных данных проводили по вышеописанной методике после 7, 14 и 30 суток выдержки минерального порошка. Полученные результаты приведены в табл. 2.

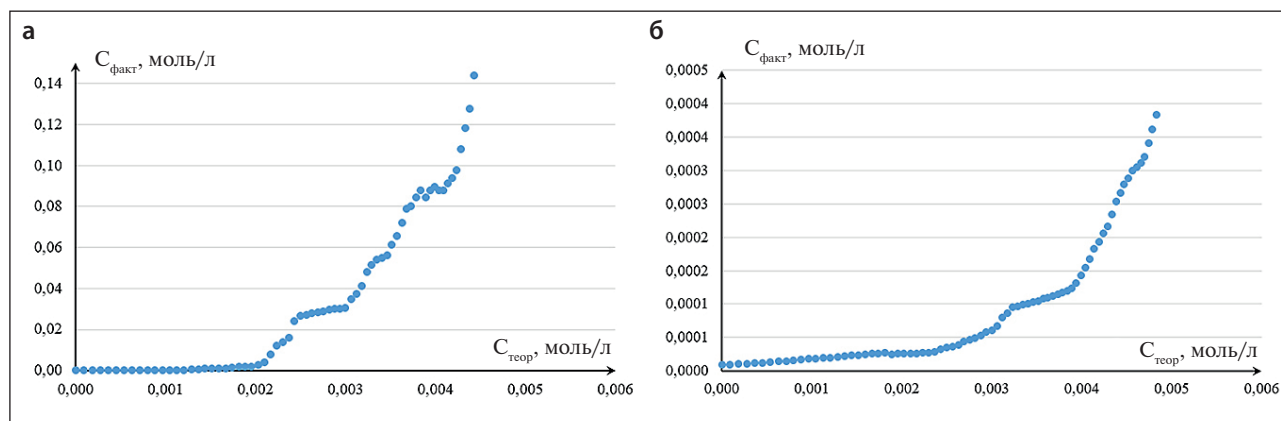


Рис. 4. Концентрационные зависимости $C_{\text{факт}}^{Ca} = f(C_{\text{теор}}^{Ca})$ для МСП с разным временем помола: а – 10 минут; б – 60 минут.

Таблица 1. Характеристика активности механоактивированных сапонитсодержащих порошков

Образец	Продолжительность помола, мин	$S_{\text{уд}}, \text{ м}^2/\text{кг}$	$C_{\text{теор}}^{Ca} / C_{\text{факт}}^{Ca}$	$\Delta C_{CaO}, \text{ мг/г}$	Γ_{∞}
МСП ₁₀	10	196	0,52	0,39	0,010
МСП ₃₀	30	644	223,40	169,09	0,783
МСП ₆₀	60	1209	256,50	194,14	0,803
МСП ₉₀	90	1428	274,42	207,70	0,813

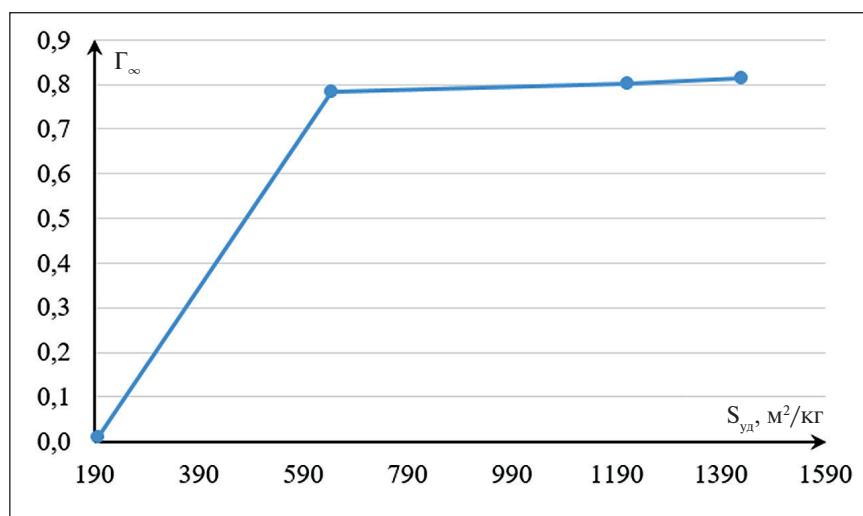


Рис. 5. Функциональная зависимость $\Gamma_{\infty} = f(S_{уд})$ для МСП, полученных при разной продолжительности помола

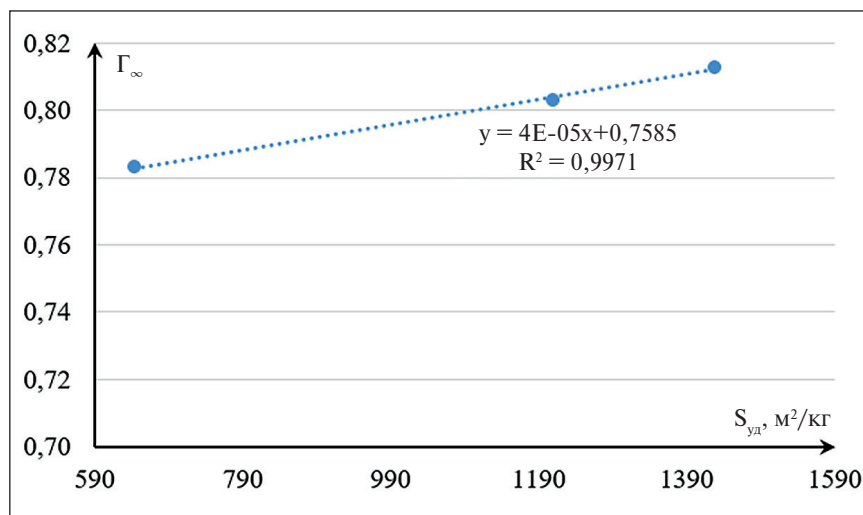


Рис. 6. Функциональная зависимость $\Gamma_{\infty} = f(S_{уд})$ для МСП, полученных при продолжительности помола более 10 мин

Таблица 2. Характеристика активности МСП при увеличении времени хранения

Образец	Время хранения, дни	$S_{уд}$, м²/кг	$C_{теор}^{Ca} / C_{факт}^{Ca}$	ΔC_{CaO} , мг/г	Γ_{∞}
МСП ₆₀	7	1206	256,50	194,14	0,803
МСП ₆₀	14	1188	221,46	167,62	0,782
МСП ₆₀	30	899	204,55	154,82	0,770

Представленные результаты (табл. 2) показывают, что в процессе хранения механоактивированного сапонитсодержащего порошка при естественных условиях происходит самопроизвольное уменьшение величины его удельной поверхности за счет конгломерации, прежде всего, частиц глинистой фракции. Однако этот процесс сопровождается уменьшением $S_{уд}$ порошка через 7 и 30 суток на 1,5% и 25% (соответственно). При этом гидравлическая активность МСП за эти временные интервалы уменьшается только на 2,6% и 4,1% (соответственно).

Полученные данные, по нашему мнению, констатируют факт сохранения длительное (30-суточное) время достаточно высокой гидравлической активности механоактивированных сапонитсодержащих порошков в широком диапазоне варьирования их удельной поверхности (300÷1200 м²/кг).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что потенциометрический метод определения сорбционной емкости по отношению к оксиду кальция может быть использован в качестве

экспресс-способа для количественного определения коэффициента гидравлической активности механоактивированного сапонитсодержащего порошка и оценки влияния на данный показатель временного фактора.

2. Установлено, что гидравлическая активность механоактивированных порошков функционально связана с их удельной поверхностью (в диапазоне значений удельной поверхности $300 \div 1200 \text{ м}^2/\text{кг}$),

причем характер этой связи описывается линейным уравнением с высоким значением коэффициента достоверности аппроксимации (0,99).

3. Механоактивированные сапонитсодержащие порошки сохраняют гидравлическую активность при хранении в естественных условиях в продолжение 30 суток. Уменьшение величины гидравлической активности МСП за данный временной интервал составляет 4,1%.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Романенко И.И., Петровнина И.Н. Факторы, позволяющие повысить эксплуатационные свойства дорожной одежды и дорожного полотна. *Дневник науки*. 2020;10(46):17. EDN: [VHRSCS](#)
2. Xiao Zhang, Kaixiang Liu, Jiacheng Zhang, Jiahang Hao, Shujie Han, Xiaolong Wang, Yijun Peng. Characteristics of crack spacing and crack width movement of early-age partially continuous reinforced concrete pavement under environmental loading: A full-scale field investigation. *Construction and Building Materials*. 2024;422:135832. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135832>
3. Евсеев С.А., Овчинников И.И. Способы повышения износостойкости слоя дорожного полотна. *Молодой ученый*. 2022;16(411):87-89. EDN: [ADXCYQ](#)
4. Sanjay Nayak, R.K. Jain, Deepa A. Joshi. Performance evaluation of continuous reinforced concrete pavement constructed in hilly region. *Materials Today: Proceedings*. 2023;77(3):953-959. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.073>
5. Seong-Min Kim, Young Kyo Cho, Jun Ho Lee. Advanced reinforced concrete pavement: Concept and design. *Construction and Building Materials*. 2020;231:117130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117130>
6. Shunman Chen, Aixiang Wu, Yiming Wang, Xun Chen, Rongfu Yan, Haoji Ma. Study on repair control technology of soft surrounding rock roadway and its application. *Engineering Failure Analysis*. 2018; 92: 443-455. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.06.006>
7. Kamenchukov A., Ishkov A., Gajduk A., Voinash S. Conceptual Approach to Performance Assessment Road Repair and Maintenance. *Transportation Research Procedia*. 2023;68: 670-679. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.093>
8. Costa F.N., Ribeiro D.V. Reduction in CO₂ emissions during production of cement, with partial replacement of traditional raw materials by civil construction waste (CCW). *Journal of Cleaner Production*. 2020;276:123302. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123302>
9. Moutaman M. Abbas. Recycling waste materials in construction: Mechanical properties and predictive modeling of Waste-Derived cement substitutes. *Waste Management Bulletin*. 2025;3(1):168-192. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.01.004>
10. Sobyenin N.M., Sergeev A.S. Use of secondary raw materials for construction of motorways. *Modernization and scientific research in the transport complex*. 2022;1:330-333.
11. Куликова А.А., Копаница Н.О., Демьяненко О.В. Бинарные модифицирующие добавки на основе вторичного сырья для цементных вяжущих. В сборнике: *Современные строительные материалы и технологии*. Калининград. 2023:14-20. EDN: [KHAECG](#)
12. Omar Turk, Sherif Yehia, Akmal Abdelfatah, Mohamed Elchalakani. Sustainable concrete production: The potential of utilizing recycled waste materials. *Journal of Building Engineering*. 2024;98:111467. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.111467>
13. Джаббарова Н.Э. Свойства цемента и бетонов на его основе с добавлением микрокремнезема. *Просвещение и познание*. 2021;7(7):3-11 EDN: [IHOIBE](#)
14. Поварова О.А., Акулова М.В. Определение оптимального состава мелкозернистого бетона с использованием техногенных отходов. *ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси*. 2023;4(73):28-37 EDN: [LRMSTM](#)
15. Сороканич С.В., Парамонова А.В. Влияние комплексной добавки на основе техногенных отходов на прочность тяжелых цементных бетонов. *Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении*. 2023;4(45):137-146. EDN: [KZYHYU](#)
16. Самойлова В.С., Шинко Р.М., Ласман И.А., Мевлидинов З.А. Дисперсно-армированный «тощий» бетон для устройства оснований автомобильных дорог. *Научный альманах*. 2024;1-3(111):81-85. EDN: [BQLANV](#)
17. Мясникова А.А. Исследование возможности применения метакрилатов в составе жаростойкого бетона. *Архитектура, градостроительство и дизайн*. 2024;2(40):3-9. EDN: [RDAXBQ](#)

18. Айзенштадт А.М., Морозова М.В., Фролова М.А., Данилов В.Е., Дроздук Т.А., Тюрин А.М. Сапонитсодержащие отходы горно-обогатительных предприятий – сырьевой резерв индустрии строительных материалов. *Экология и промышленность России*. 2024;28(7):20–25. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-7-20-25> EDN: JLonBM
19. Телятьев О.И., Новиков П.В. Физико-геологическая модель кимберлитовых тел в пределах лицензионной площади месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова. В книге: *Молодые – Научкам о Земле. Тезисы докладов X Международной научной конференции молодых ученых. В 7-ми томах. Москва*. 2022: 109–113
20. Двойченкова Г.П., Миненко В.Г., Масанов А.Ю., Тимофеев А.С. Обоснование криогенной технологии осветления сапонитсодержащей оборотной воды хвостохранилища обогатительной фабрики № 1 АО «Севералмаз». *Устойчивое развитие горных территорий*. 2024;16(60):692–709. EDN: DNVBSQ
21. Morozova M., Frolova M., Makhova T. Synthesis of low-base calcium silicates in concrete modified by microdispersed saponite-containing component. *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019*. Conference proceedings. 2019: 427–434.
22. Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Данилов В.Е., Дроздук Т.А., Малыгина М.А. Модификационные превращения сапонитсодержащего материала при механическом помоле. *Строительные материалы*. 2023;7:54–59. EDN: QWPMZV
23. Дмитрак Ю.В., Вернигор В.В. Активные минеральные добавки в составе композиционных вяжущих. *Технологии бетонов*. 2022;1(180):73–80. EDN: KOFFSZ
24. Shaokun Ma, Ruifeng Yang, Zhao Lu, Hu Lu, Weihang Zhao, Hongqi Chen, Meilin Liu/ Effects of different mineral admixtures on the properties of magnesium potassium phosphate cement mortar. *Case Studies in Construction Materials*. 2025;22:e04415. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04415>
25. Anja Terzić, Lato Pezo, Nevenka Mijatović, Jovica Stojanović, Milan Kragović, Ljiljana Miličić, Ljubiša Andrić. The effect of alternations in mineral additives (zeolite, bentonite, fly ash) on physico-chemical behavior of Portland cement based binders. *Construction and Building Materials*. 2018;180:199–210. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.007>
26. Соколова Ю.В., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Шинкарук А.А., Махова Т.А. Потенциометрический метод оценки пуццолановой активности высокодисперсных материалов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2023;15(4):349–358. EDN: EPOVXX
27. Фролова М.А., Лесовик В.С., Морозова М.В., Орехова Т.Н. Потенциометрический метод определения гидравлической активности кварцсодержащих порошков. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(1):32–41. EDN: WPDJVA
28. Айзенштадт А.М., Данилов В.Е., Фролова М.А., Беляев А.О., Тюрин А.М., Марьяндышев П.А., Самофалов В.Ю. Характеристика полиминеральных порошков горно-обогатительной фабрики АО «Севералмаз». *Материаловедение*. 2024;5:3–9. EDN: KNSAMR

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Морозова Марина Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения, реставрации и экологии в строительстве, Северный (Арктический) Федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия, m.morozova@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8497-9786>

Фролова Мария Аркадьевна – кандидат химических наук, доцент, заведующий кафедрой материаловедения, реставрации и экологии в строительстве, Северный (Арктический) Федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия, m.aizenstadt@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4079-5066>

ВКЛАД АВТОРОВ

Морозова М.В. – проведение исследований, сбор, анализ и обработка полученных результатов, написание статьи.

Фролова М.А. – проведение исследований, сбор, анализ и обработка полученных результатов, написание статьи, научное редактирование текста.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.05.2025; одобрена после рецензирования 05.06.2025; принята к публикации 09.06.2025.