DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-28-36

Першин З.А., Айзенштадт А.М., Махова Т.А., Пожилов М.А.
Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова
**E-mail: pershin.z@edu.narfu.ru*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА МЕХАНОАКТИВАЦИИ ПОРОШКОВ ИЗ КИРПИЧНОГО БОЯ

Аннотация. *Дана характеристика процесса механоактивации порошка кирпичного боя как способа повышения реакционной способности дисперсных минеральных систем. В качестве объекта исследования использован порошок кирпичного боя с истинной плотностью 2380 кг/м^3 и содержанием SiO_2 53,8 %. Измельчение проводилось на планетарной шаровой мельнице при продолжительности помола от 1 до 20 минут. Характеристики дисперсности определены методом газопроницаемости Козени–Кармана. Поверхностное натяжение (удельная поверхностная энергия) порошков рассчитано методом ОВРК на приборе Easy Drop с использованием двух тестовых жидкостей – декана и дистиллированной воды. Для оценки степени механоактивации применена энергетическая модель, основанная на расчёте удельной массовой энергии атомизации, поверхностной энергии, коэффициентов активности и фрактальной размерности поверхности. Установлено, что удельная массовая энергия атомизации порошка кирпичного боя составляет 114,076 МДж/кг, энергоплотность – 271,5 кДж/см^3. Поверхностное натяжение возрастает с 69,26 до 71,31 мДж/м^2 с увеличением продолжительности помола до 20 минут. Поверхностная энергия (E_s) увеличивается с 12 до 59 Дж/кг, активность поверхности (k_s) – в 4,9 раза, фрактальная размерность (D_s) изменяется в диапазоне от 2,163 до 2,261. Показано, что процесс механоактивации ограничивается временными рамками от 3 до 5 мин. Установлено, что в начальный период помола рост удельной поверхности обусловлен как диспергированием материала, так и активацией поверхности частиц.*

Ключевые слова: *кирпичный бой, механоактивация, энергия атомизации, фрактальная размерность, поверхностное натяжение, метод ОВРК, дисперсность.*

Введение. Использование отходов строительного производства в качестве вторичного сырья является актуальным направлением современного строительного материаловедения [1–4]. Кирпичный бой, образующийся при сносе зданий и в процессе производства керамического кирпича, представляет собой алюмосиликатный материал с высоким содержанием SiO_2 и Al_2O_3, потенциально обладающий пуццолановой активностью. Однако в исходном состоянии реакционная способность кирпичного боя недостаточна для эффективного использования в составе композиционных вяжущих без предварительной активации.

Механоактивация (интенсивное механическое воздействие на дисперсный материал) – позволяет существенно повысить реакционную способность минеральных порошков за счёт увеличения удельной поверхности, накопления структурных дефектов и разрыва химических связей в поверхностном слое частиц [5–9]. При этом традиционные параметры дисперсности не в полной мере отражают степень активации: два порошка с одинаковой удельной поверхностью могут существенно различаться по реакционной способности [10–12].

Для комплексной оценки эффективности механоактивации разработана энергетическая модель [13–15], основанная на расчёте поверхностной энергии, соотношения коэффициентов активности (k_a/k_s) и фрактальной размерности поверхности (D_s). Данная модель позволяет определить временные рамки процессов механоактивации и (или) простого диспергирования.

Цель настоящей работы – экспериментальное определение характеристик дисперсности и поверхностного натяжения (численно равное удельной поверхностной энергии) порошка кирпичного боя при различной продолжительности помола и расчёт критериев механоактивации по энергетической модели.

Материалы и методы. В качестве исходного материала использовался порошок кирпичного боя, истинная плотность которого (ρ) определялась по методике ГОСТ 32763—2014 «Порошок минеральный. Метод определения истинной плотности». Химический (элементный) состав в пересчёте на оксиды установлен методом рентгенофлуоресцентного анализа на анализаторе ПРФА МетЭксперт.

Измельчение проводилось на планетарной шаровой мельнице Retsch PM100 при скорости вращения ротора 420 об/мин и продолжительности помола от 1 до 20 минут. Удельная поверхность ($S_{уд}$) и среднемассовый размер частиц (d) определены методом газопроницаемости Козени–Кармана на анализаторе ПСХ-10М.

Поверхностное натяжение (σ) определено методом ОВРК (Оуэнса–Вендта–Рабела–Кэлбла) [16] на приборе Easy Drop (KRÜSS) по краевым углам смачивания двумя тестовыми жидкостями: деканом (неполярная жидкость с σ = 23,9 мДж/м^2) и дистиллированной водой (полярная жидкость с σ = 72,8 мДж/м^2) [17]. Известно, что метод ОВРК, представляющий собой неразрушающий метод, основан на том, что удельная поверхностная энергия (поверхностное натяжение) является суммой полярной и дисперсионной составляющих и рассчитывается по линейной регрессии, построенной по результатам измерения краевых углов смачивания твердой фазы рабочими жидкостями с известными полярными и дисперсионными составляющими.

Измерения выполнены на компактах из порошков с продолжительностью помола (τ) 1, 3, 5, 10, 15 и 20 мин. Компакты для измерения краевых углов получены запрессовкой порошков в металлические формы (диаметром 20 мм) при избыточном давлении 2 т, создаваемом гидравлическим прессом ПЛГ-20, с выдержкой 2 мин. Следует отметить, что точность расчета поверхностного натяжения реализуемого по углам смачивания, измеряемым на поверхности компактов (как показано в [18]) составляет ±0,02 мДж/м^2.

Расчёт критериев механоактивации выполнен по энергетической модели [13]. Значения энергий атомизации (E_a) оксидов, необходимые для расчета удельной массовой энергии атомизации (E_m), приняты по справочным термохимическим данным [19]. Энергоплотность (удельная объемная энергия атомизации) исходного порошка (Ev) рассчитывалась, исходя из следующего соотношения [20]:

$$E_v = E_m \cdot \rho \qquad (1)$$

Основная часть. Характеристики дисперсности. Химический состав исходного минерального порошка, истинная плотность которого составила ρ = 2380 кг/м^3, представлен в таблице 1.

Таблица 1

Элементный состав порошка кирпичного боя в пересчёте на оксиды

Оксид	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	TiO_2	K_2O	SiO_2
Содержание, %	14,2	11,2	15,0	1,2	4,6	53,8

Результаты измерений удельной поверхности и среднемассового размера частиц при различной продолжительности помола (τ) представлены на рисунке 1. Зависимость удельной поверхности от продолжительности помола аппроксимируется полиномом с коэффициентом достоверности аппроксимации (R^2=0,94):

$$S_{уд} = -1{,}9\tau^2 + 69{,}1\tau + 187 \qquad (2)$$

Приведенные функциональные зависимости (рис. 1) демонстрируют нелинейный характер: в первые 5 мин наблюдается интенсивный рост ($S_{уд}$) и резкое уменьшение (d) (величина удельной поверхности возрастает на 69% и на 69% уменьшается средний размер частиц), после чего скорость изменения параметров снижается, что свидетельствует о переходе от активного диспергирования к стадии, близкой к практической стабилизации дисперсного состояния порошка (изменение данных параметров составило 33%). При этом следует отметить, что идеально совпадающие значения процентного изменения данных параметров ($S_{уд}$ и d) может свидетельствовать о том, что отсутствует эффект агрегации частиц дисперсной фазы, а более интенсивное изменение определяемых характеристик на первой временной стадии помола может быть связано с параллельно протекающими процессами их активации [7].

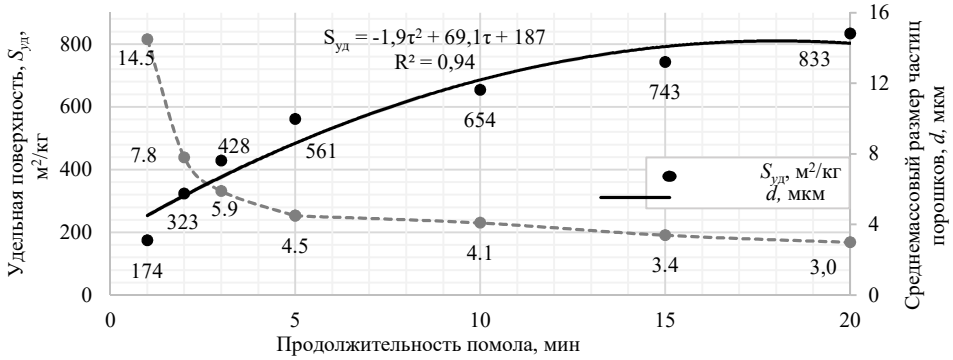


Рис. 1. Зависимость удельной поверхности и среднемассового размера частиц от продолжительности помола

Поверхностное натяжение. Результаты определения поверхностного натяжения методом ОВРК представлены в таблице 2. Анализ полученных данных выявил характерную закономерность. В интервале от 0 до 5 минут помола

наблюдается интенсивный рост суммарного поверхностного натяжения с 68,41 до 71,34 мДж/м², сопровождаемый увеличением поляризационной составляющей (σ_p) с 43,78 до 48,83 мДж/м². В этот период одновременно происходит интенсивный прирост удельной поверхности, что обусловливает значительный рост поверхностной энергии (E_s) за счёт двух факторов – увеличения как (σ), так и ($S_{уд}$). По полученным данным построена зависимость $\sigma(\tau)$, аппроксимированная полиномом третьей степени с коэффициентом достоверности аппроксимации (R^2=0,95):

$$\sigma = 0{,}0023\tau^3 - 0{,}0849\tau^2 + 0{,}9287\tau + 68{,}41, \quad (3)$$

где τ – продолжительность помола, мин.

В качестве начального значения (σ_0), соответствующего состоянию материала до механоактивации (τ = 0), принят свободный член полинома: σ_0 = 68,41 мДж/м².

Таблица 2

Поверхностное натяжение (σ) и его составляющие (σ_p – поляризационное и σ_d – дисперсионное поверхностные натяжения порошков)

t, мин	σ_d, мДж/м²	σ_p, мДж/м²	σ, мДж/м²
0	24,63	43,78	68,41
1	24,06	45,20	69,26
2	23,62	46,33	69,95
3	23,42	47,01	70,43
5	22,51	48,83	71,34
10	23,04	48,35	71,39
15	23,42	47,60	71,02
20	23,40	47,91	71,31

Начиная с продолжительности помола более 5 минут суммарное поверхностное натяжение стабилизируется на уровне (71,35±0,05) мДж/м² и практически не изменяется при дальнейшем увеличении продолжительности помола до 20 минут (усредненное значение σ рассчитано без учета значения 71,02 мДж/м², так как считаем, что данная величина является случайным отклонением в связи со сложностью экспериментальной фиксации углов смачивания на поверхности компактов). Полярная составляющая (σ_p) также выходит на плато при значении (48,36±0,06) мДж/м². По нашему мнению, это означает, что после 5 минут дальнейший рост (E_s) происходит исключительно за счёт прироста удельной поверхности, тогда как удельные энергетические поверхностные характеристики частиц уже не изменяются.

Следует отметить, что стабилизация значений (σ_p) может свидетельствовать об образовании практически максимально возможных полярных активных центров при пятиминутной продолжительности помола.

Зависимость суммарного поверхностного натяжения (σ) и удельной поверхности ($S_{уд}$) от продолжительности помола представленная на рисунке 2 показывает, что при увеличении продолжительности помола более 5 мин удельная поверхностная энергия (т.е. энергия, приходящаяся на единицу площади поверхности) достигает своего максимального значения при 10 минутном режиме (71,39 мДж/м²). При дальнейшем увеличении временного фактора помола происходит возрастание удельной поверхности, что вызывает незначительное уменьшение σ, например, при 20 мин, до 71,31 мДж/м² (табл. 3).

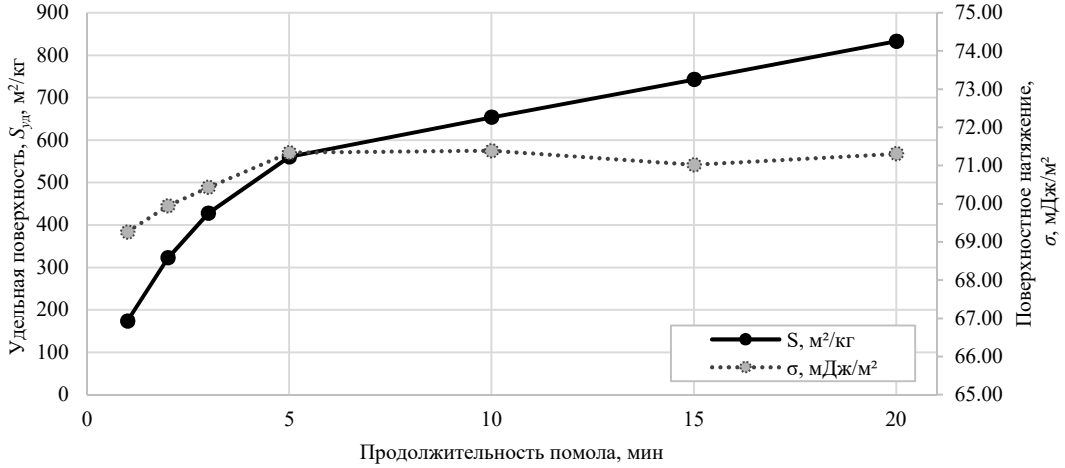


Рис. 2. Зависимость поверхностного натяжения σ и удельной поверхности $S_{уд}$ от продолжительности помола

Удельная массовая энергия атомизации. Для многокомпонентной системы, исходя из определенного нами оксидного состава порошка (табл. 1), рассчитана величина удельной массовой энергии атомизации (E_m) по следующей формуле [13–14, 18–19]:

$$E_m = \Sigma\,(E_{a,i} \cdot w_i / M_i), \quad (4)$$

где $E_{a,i}$ – энергия атомизации i-го оксида, кДж/моль;

w_i – массовая доля;

M_i – молярная масса, г/моль.

Результаты расчета приведены в таблице 3.

Таблица 3

Расчёт удельной массовой энергии атомизации порошка кирпичного боя

Оксид	w_i, %	M_i, г/моль	$E_{a,i}$, кДж/моль	w_i/M_i	$E_{a,i}\cdot w_i/M_i$, кДж/г
CaO	14,2	56,08	3513	0,00253	8,895
Fe_2O_3	11,2	159,69	14309	0,00070	10,036
Al_2O_3	15,0	101,96	15065	0,00147	22,163
TiO_2	1,2	79,87	9757	0,00015	1,466
K_2O	4,6	94,20	2232	0,00049	1,090
SiO_2	53,8	60,09	7866	0,00895	70,426
Σ	100,0	–	–	–	114,076

Таким образом, E_m = 114,076 кДж/г = 114,076 МДж/кг. Полученное значение отражает суммарную энергию межатомных связей в единице массы материала и используется в дальнейшем при расчёте критериев механоактивации. Кроме того, ориентируясь на предложенную в [20] энергетическую классификацию минеральных систем по энергоплотности (E_v, кДж/см^3) и учитывая, что $E_v=E_m \cdot \rho$, исследуемый материал со значением E_v=271,5 кДж/см^3 относится к высокоэнергоплотным.

Поверхностная энергия и критерии механоактивации. Поверхностная энергия (E_s) представляет собой энергию, сосредоточенную на поверхности единицы массы порошка, и определяется как [13]:

$$E_s = \sigma \cdot S_{\text{уд}} \quad (5)$$

Активность поверхности (k_s) – безразмерная характеристика, отражающая долю поверхностной энергии в общей энергии атомизации:

$$k_s = \frac{E_s}{E_m} = \frac{\sigma \cdot S_{\text{уд}}}{E_m} \quad (6)$$

Соотношение коэффициентов (k_a/k_s) характеризует эффективность расходования механической энергии на активацию поверхностного слоя:

$$k_a/k_s = \frac{3\cdot\sigma_0}{E_m\cdot \rho_m\cdot R_0}, \quad (7)$$

где R_0 – радиус частиц исходного материала, м;

k_a – доля разорванных химических связей в активированном поверхностном слое частицы.

Фрактальная размерность поверхности (D_s) рассчитывается по формуле [15]:

$$D_s = 3 - \frac{ln(3/S_\infty\cdot\rho_m)}{ln(3/S\cdot\rho_m)}, \quad (8)$$

где S_∞ – удельная поверхность исходного материала, м^2/кг;

S – удельная поверхность порошка после механической обработки, м^2/кг;

ρ_m – плотность вещества частицы (принимаем равную плотности ρ), кг/м^3.

Результаты расчёта всех критериев механоактивации сведены в таблицу 4.

Таблица 4

Критерии механоактивации порошка кирпичного боя

t, мин	S, м^2/кг	d, мкм	σ, мДж/м^2	E_s, Дж/кг	$k_s \cdot 10^{-6}$	$k_a/k_s \cdot 10^{-6}$	D_s
1	174	14,5	69,26	12,051	0,1056	0,1043	2,1632
2	323	7,8	69,95	22,594	0,1981	0,1938	2,2048
3	428	5,9	70,43	30,144	0,2642	0,2562	2,2224
5	561	4,5	71,34	40,022	0,3508	0,3360	2,2385
10	654	4,1	71,39	46,689	0,4093	0,3687	2,2474
15	743	3,4	71,02	52,768	0,4626	0,4447	2,2546
20	833	3,0	71,31	59,401	0,5207	0,5039	2,2610

Анализ интенсивности механоактивации. Интенсивность механоактивации ($\Delta S_{уд}/\Delta t$) – скорость прироста удельной поверхности, м^2/(кг·мин), определяется по формуле:

$$\Delta S_{уд}/\Delta t = \frac{S(t_2) - S(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (9)$$

В первые минуты помола интенсивность максимальна: в интервале 1–2 мин составляет 149 м^2/(кг·мин), в интервале 2–3 мин – 105 м^2/(кг·мин). Начиная с 5–10 мин скорость прироста стабилизируется на уровне ≈ 18 м^2/(кг·мин),

что свидетельствует о переходе к стадии, близкой к практической стабилизации дисперсного состояния порошка.

На рисунке 3 представлена зависимость (D_s) и (k_a/k_s) от продолжительности помола. В интервале 1–3 мин (D_s) и (k_a/k_s) нарастают примерно с одинаковой скоростью. Начиная с 5 мин скорость роста (D_s) заметно замедляется, тогда как (k_a/k_s) продолжает возрастать. Разрыв между скоростями изменения этих двух критериев свидетельствует о том, что механическая энергия всё в большей мере расходуется на накопление дефектов и разрыв химических связей, а не на геометрическое измельчение. Так, в первый временной период фрактальная размерность увеличивается на 3,6 %, а в последующие временные рамки – всего на 0,8 %.

Это соответствует закономерности, установленной в [11, 12], и позволяет считать, что для порошка кирпичного боя наиболее интенсивно механоактивация происходит при продолжительности помола от 3 до 5 минут.

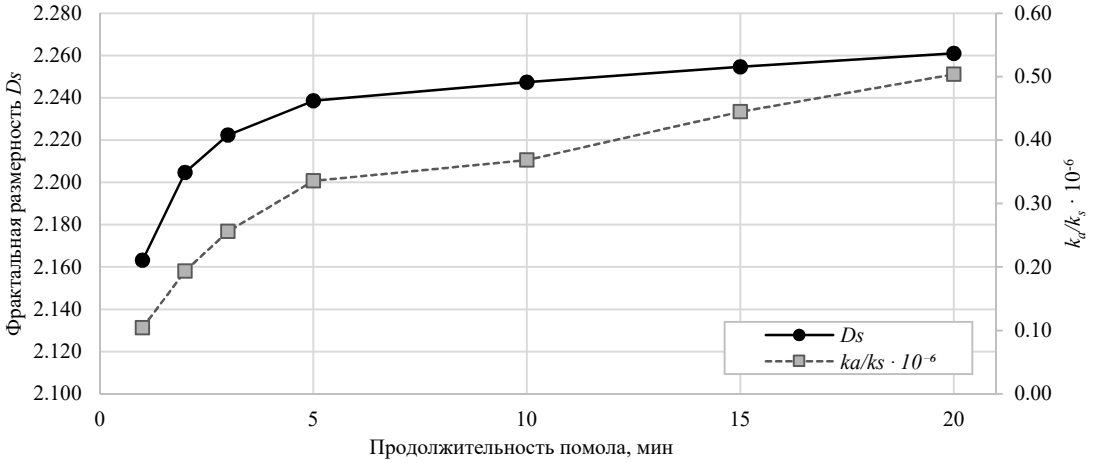


Рис. 3. Зависимость фрактальной размерности (D_s) и соотношения (k_a/k_s) от продолжительности помола

Установленное временное окно механоактивации (3–5 мин) подтверждается совокупным анализом всех рассчитанных критериев. В данном интервале наблюдается одновременный интенсивный рост поверхностной энергии (E_s), соотношения (k_a/k_s) и фрактальной размерности (D_s), что свидетельствует о максимальной эффективности преобразования механической энергии в энергию активированной поверхности. При продолжительности помола свыше 5 мин прирост поверхностного натяжения σ прекращается, фрактальная размерность выходит на плато, а дальнейший рост (E_s) обеспечивается исключительно за счёт увеличения удельной поверхности ($S_{уд}$). Это означает, что дополнительные энергетические затраты на помол уже не приводят к качественному изменению поверхности частиц, а лишь к её количественному увеличению. С практической точки зрения помол свыше 5 мин нецелесообразен: удельные затраты энергии на единицу прироста реакционной способности резко возрастают, тогда как реакционная способность порошка как активной минеральной добавки фактически стабилизируется.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными, представленными нами ранее в [21], которые позволили установить, что замена в бетонных смесях цемента данной высокодисперсной добавкой (полученной из порошка кирпичного боя) в количестве 20 мас. %, изготовленной при продолжительности помола на шаровой мельнице 5 мин (из всего рассматриваемого временного диапазона, равного 1÷20 мин), позволяет получить максимальные значения физико-механических характеристик (прочности при сжатии и изгибе), сравнимые со значениями этих параметров для контрольных образцов.

Выводы.

1. Удельная массовая энергия атомизации и энергоплотность порошка кирпичного боя составила E_m = 114,076 МДж/кг и E_v = 271,5 кДж/см^3, соответственно, что позволяет отнести его к высокоэнергоплотным материалам с достаточно значимым потенциалом реакционной способности.

2. Поверхностное натяжение порошков, определённое методом ОВРК, возрастает с 68,41 мДж/м^2 (исходное состояние) до 71,31 мДж/м^2 при продолжительности помола 20 мин, что отражает изменение поверхностных свойств в процессе механоактивации. Установлено, что при механическом помоле сырьевого материала кирпичного боя в продолжение 1÷20 мин поверхностная энергия и активность поверхности увеличиваются практически в 5 раз. Определено, что в процессе получения минерального порошка

происходит накопление дефектов кристаллической структуры частиц, связанных с разрывом химических связей и их концентрированием в поверхностном слое и объемной фазе. Кроме того, показано, что фрактальная размерность поверхности возрастает от 2,163 до 2,261, что отражает повышение шероховатости и степени развитости поверхности частиц вследствие накопления дефектов при механической обработке. Таким образом, можно заключить, что порошок кирпичного боя, полученный методом механического диспергирования, проявляет свойства активной минеральной добавки в вяжущих композициях гидратационного типа твердения.

3. Рациональная продолжительность помола на используемом размольном аппарате при получении порошка исследуемого кирпичного боя как компонента композиционного вяжущего составляет 3–5 минут. Однако следует отметить, что увеличение продолжительности механического диспергирования способствует дальнейшей активации поверхности высокодисперсной системы, но данный процесс характеризуется не высокой интенсивностью и связан с дополнительными энергетическими затратами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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 БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 85–89. EDN: VWZDKD

2. Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р. Роль активных минеральных добавок природного происхождения в формировании структуры и свойств гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20, № 6. С. 60–63. EDN: YIXKDB

3. Красиникова Н.М., Хозин В.Г. Вторичное использование бетонного лома в качестве сырьевых компонентов цементных бетонов // Строительные материалы. 2020. № 1–2. С. 56–65. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-56-65

4. Лесовик Р.В., Ахмед А.А.А., Аласханов А.Х. Вяжущее из пылевидной фракции фрагментов разрушенных зданий и сооружений Ирака // Региональная архитектура и строительство. 2020. Т. 1, № 42. С. 69–76. EDN: UWNPEB

5. Нелюбова В.В., Строкова В.В., Осадчий Е.Г., Подгорный И.И., Шаповалов Н.А. Механоактивация как способ управления процессами структурообразования автоклавных материалов на различных уровнях организации // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 3. С. 7–9. EDN: PSINCX

6. Болдырев В.В. Механохимия и механическая активация твёрдых веществ // Успехи химии. 2006. Т. 75, № 3. С. 203–216. EDN: HSQIOV

7. Адылходжаев А.И., Кадыров И.А., Умаров К.С., Назаров А.А. К вопросу механоактивации цеолитсодержащих пород // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16, № 3. С. 489–498. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-489-498. EDN: HCSHIW

8. Айзенштадт А.М., Королев В.Е., Малыгина М.А., Дроздюк Т.А., Фролова М.А. Структурная модификация высокодисперсных порошков вскрышных пород сапонитсодержащей бентонитовой глины // Физика и химия обработки материалов. 2023. № 1. С. 56–63. DOI: 10.30791/0015-3214-2023-1-56-63. EDN: BGBWRA

9. Евтушенко Е.И., Череватова А.В., Кожухова Н.И., Осадчая М.С., Старостина И.В., Кожухова М.И. Изучение эффективности механоактивации отсева гранита в мельницах различного типа при синтезе наноструктурированного вяжущего // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 11. С. 102–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-102-112. EDN: LFSJMU

10. Сивальнева М.Н., Строкова В.В., Нелюбова В.В., Огурцова Ю.Н., Орехова Т.Н., Боцман Л.Н., Нецвет Д.Д. Методы оценки механоактивированного минерального сырья для композиционных вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 9. С. 8–22. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-9-8-22. EDN: HHBIWY

11. Нелюбова В.В., Строкова В.В., Данилов В.Е., Айзенштадт А.М. Комплексная оценка активности кремнеземсодержащего сырья как показателя эффективности механоактивации // Обогащение руд. 2022. № 2. С. 17–25. DOI: 10.17580/or.2022.02.03. EDN: GTUQRF

12. Шаманина А.В., Айзенштадт А.М., Кононова В.М., Данилов В.Е. Оценка эффективности механоактивации кремнеземсодержащих горных пород // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 19–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-19-27. EDN: URTMHC

13. Фролова М.А., Королев Е.В. Энергетическая модель активации поверхности минеральных компонентов строительных композиционных материалов // Строительные материалы. 2025. № 1–2. С. 72–78. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-832-1-2-72-78. EDN: ACLZDE

14. Фролова М.А. Концептуальные аспекты конструирования минеральных порошковых композиций из сырья природного и техногенного происхождения // Строительные материалы.

2024. № 12. С. 28–33. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-831-12-28-33. EDN: GITXLI

15. Лесовик В.С., Фролова М.А., Айзенштадт А.М. Поверхностная активность горных пород // Строительные материалы. 2013. № 11. С. 71–73. EDN: RKXZQX

16. Данилов В.Е., Королев Е.В., Айзенштадт А.М., Строкова В.В. Особенности расчета свободной энергии поверхности на основе модели межфазного взаимодействия Оунса–Вендта–Рабеля–Кьельбле // Строительные материалы. 2019. № 11. С. 66–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-776-11-66-72

17. Королев Е.В., Гришина А.Н., Пустовгар А.П. Поверхностное натяжение в структурообразовании материалов. Значение, расчет и применение // Строительные материалы. 2017. № 1–2. С. 104–109. EDN: XXIHWL

18. Фролова М.А., Тутыгин А.С., Айзенштадт А.М., Лесовик В.С., Махова Т.А., Поспелова Т.А. Критерий оценки энергетических свойств поверхности // Наносистемы: физика, химия, математика. 2011. № 2(4). С. 120–125. EDN: OWOOPZ

19. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. А.А. Равделя, А.М. Пономарёвой. 10-е изд., испр. и доп. СПб.: Иван Фёдоров, 2003. 240 с.

20. Зуев В.В., Поцелуев Л.Н., Гончаров Ю.Д. Кристаллоэнергетика как основа оценки магнезиальных свойств твердотелых материалов (включая магнезиальные цементы). СПб.: ООО АЛЬФАПОЛ, 2006. 119 с.

21. Дроздюк Т.А., Айзенштадт А.М., Першин З.А., Данилов В.Е. Мелкозернистый бетон с добавкой высокодисперсного порошка кирпичного боя // Строительные материалы. 2024. № 9. С. 30–35. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-828-9-30-35

Информация об авторах

Першин Захар Андреевич, аспирант кафедры строительных материалов, инженерных конструкций и архитектуры. E-mail: pershin.z@edu.narfu.ru. Северный Арктический федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17.

Айзенштадт Аркадий Михайлович, доктор химических наук, профессор кафедры строительных материалов, инженерных конструкций и архитектуры. E-mail: a.isenshtadt@narfu.ru. Северный Арктический федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17.

Махова Татьяна Анатольевна, кандидат химических наук, доцент кафедры строительных материалов, инженерных конструкций и архитектуры. E-mail: t.mahova@narfu.ru. Северный Арктический федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17.

Пожилов Михаил Андреевич, магистрант кафедры строительных материалов, инженерных конструкций и архитектуры. E-mail: pozhilov.m@edu.narfu.ru. Северный Арктический федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17.

Поступила 28.05.2026 г.

© Першин З.А., Айзенштадт А.М., Махова Т.А., Пожилов М.А., 2026

Pershin Z.A., Ayzenshtadt A.M., Makhova T.A., Pozhilov M.A.

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

**E-mail: pershin.z@edu.narfu.ru*

ENERGY PARAMETERS FOR CHARACTERIZATION OF MECHANICAL ACTIVATION OF BRICK WASTE POWDERS

Abstract. *The mechanical activation of brick waste powder as a method of increasing the reactivity of dispersed mineral systems has been studied. Brick waste powder with a true density of 2380 kg/m^3 and SiO_2 content of 53.8% was used as the object of study. Grinding was carried out in a planetary ball mill for 1 to 20 minutes. Dispersity characteristics were determined by the Kozeny–Carman gas permeability method. Surface tension of the powders was determined by the OWRK method using an Easy Drop instrument with decane and distilled water as test liquids. The energy model based on calculating specific mass atomization energy, surface energy, activity coefficients and fractal surface dimension was applied to assess the degree of mechanical activation. The specific mass atomization energy of brick waste powder was found to be 114.076 MJ/kg and energy density is 271.5 kJ/cm³. The surface tension increased from 69.26 to 71.31 mJ/m^2 with increasing grinding time from 0 to 20 minutes. Surface energy E_s increases from 12 to 59 J/kg, surface activity ks increases*

4.9-fold, and fractal dimension D_s increases from 2.163 to 2.261. The transition from simple dispersion to mechanical activation occurs at a grinding duration of 3 to 5 minutes.

Keywords: *brick waste, mechanical activation, atomization energy, fractal dimension, surface tension, OWRK method, dispersity.*

REFERENCES

1. Alfimova N.I., Kalatozi V.V., Karatsupa S.V., Vishnevskaya Ya.Yu., Sheychenko M.S. Mechanical activation as a method for improving the efficiency of 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 BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 6. Pp. 85–89. EDN: VWZDKD. (rus)

2. Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R. The role of active mineral additives of natural origin in the formation of structure and properties of gypsum-cement-pozzolanic binder [Rol' aktivnykh mineral'nykh dobavok prirodnogo proiskhozhdeniya v formirovanii struktury i svoystv gipsotsementnoputstsolanovogo vyazhushchego]. Vestnik of Kazan Technological University. 2017. Vol. 20. No. 6. Pp. 60–63. EDN: YIXKDB. (rus)

3. Krasinikova N.M., Khozin V.G. Reuse of concrete waste as input products for cement concretes [Vtorichnoe ispol'zovanie betonnogo loma v kachestve syr'evykh komponentov tsementnykh betonov]. Stroitel'nye Materialy. 2020. No. 1–2. Pp. 56–65. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-56-65. (rus)

4. Lesovik R.V., Akhmed A.A.A., Alaskhanov A.Kh. Binder from the dust fraction of fragments of demolished buildings and structures in Iraq [Vyazhushchee iz pylevidnoy fraktsii fragmentov razrushennykh zdaniy i sooruzheniy Iraka]. Regionalnaya Arkhitektura i Stroitelstvo. 2020. Vol. 1. No. 42. Pp. 69–76. EDN: UWNPEB. (rus)

5. Nelyubova V.V., Strokova V.V., Osadchiy E.G., Podgornyy I.I., Shapovalov N.A. Mechanical activation as a method of controlling structure formation processes of autoclave materials at various organizational levels [Mekhanoaktivatsiya kak sposob upravleniya protsessami strukturoobrazovaniya avtoklavnykh materialov na razlichnykh urovnyakh organizatsii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. No. 3. Pp. 7–9. EDN: PSINCX. (rus)

6. Boldyrev V.V. Mechanochemistry and mechanical activation of solids [Mekhanokhimiya i mekhanicheskaya aktivatsiya tvyordykh veshchestv]. Russian Chemical Reviews. 2006. Vol. 75. No. 3. Pp. 203–216. EDN: HSQIOV. (rus)

7. Adylkhodzhaev A.I., Kadyrov I.A., Umarov K.S., Nazarov A.A. On the mechanical activation of zeolite-containing rocks [K voprosu mekhanoaktivatsii tseolitsoderzhashchikh porod]. Proceedings of Petersburg Transport University. 2019. Vol. 16. No. 3. Pp. 489–498. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-489-498. EDN: HCSHIW. (rus)

8. Ayzenshtadt A.M., Korolev V.E., Malygina M.A., Drozdyuk T.A., Frolova M.A. Structural modification of highly dispersed powders of overburden rocks of saponite-containing bentonite clay [Strukturnaya modifikatsiya vysokodispersnykh poroshkov vskryshnykh porod saponitsoderzhashchey bentonitovoy gliny]. Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov. 2023. No. 1. Pp. 56–63. DOI: 10.30791/0015-3214-2023-1-56-63. EDN: BGBWRA. (rus)

9. Evtushenko E.I., Cherevatova A.V., Kozhuhova N.I., Osadchaya M.S., Starostina I.V., Kozhuhova M.I. Study of the effectiveness of mechanical activation of granite screenings in mills of various types in the synthesis of nanostructured binder [Izuchenie effektivnosti mekhanoaktivatsii otseva granita v mel'nitsakh razlichnogo tipa pri sinteze nanostrukturirovannogo vyazhushchego]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 11. Pp. 102–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-102-112. EDN: LFSJMU. (rus)

10. SSival'neva M.N., Strokova V.V., Nelyubova V.V., Ogurcova Yu.N., Orekhova T.N., Bocman L.N., Necvet D.D.Methods for evaluating mechanically activated mineral raw materials for composite binders [Metody otsenki mekhanoaktivirovannogo mineral'nogo syr'ya dlya kompozitsionnykh vyazhushchikh]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 9. Pp. 8–22. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-9-8-22. EDN: HHBIWY. (rus)

11. Nelyubova V.V., Strokova V.V., Danilov V.E., Ayzenshtadt A.M. Comprehensive assessment of the activity of silica-containing raw materials as an indicator of mechanical activation efficiency [Kompleksnaya otsenka aktivnosti kremnezemsoderzhashchego syr'ya kak pokazatelya effektivnosti mekhanoaktivatsii]. Obogashcheniye Rud. 2022. No. 2. Pp. 17–25. DOI: 10.17580/or.2022.02.03. EDN: GTUQRF. (rus)

12. Shamanina A.V., Ayzenshtadt A.M., Kononova V.M., Danilov V.E. Evaluation of the effectiveness of mechanical activation of silica-containing rocks [Otsenka effektivnosti mekhanoaktivatsii kremnezemsoderzhashchikh gornykh porod]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 5. Pp. 19–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-19-27. EDN: URTMHC. (rus)

13.Frolova M.A., Korolev E.V. Energy model of surface activation of mineral components of composite building materials [Energeticheskaya model' aktivatsii poverkhnosti mineral'nykh komponentov stroitel'nykh kompozitsionnykh materialov]. Stroitel'nye Materialy. 2025. No. 1–2. Pp. 72–78. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-832-1-2-72-78. EDN: ACLZDE. (rus)

14.Frolova M.A. Conceptual aspects of designing mineral powder compositions from natural and man-made raw materials [Kontseptual'nye aspekty konstruirovaniya mineral'nykh poroshkovykh kompozitsiy iz syr'ya prirodnogo i tekhnogennogo proiskhozhdeniya]. Stroitel'nye Materialy. 2024. No. 12. Pp. 28–33. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-831-12-28-33. EDN: GITXLI. (rus)

15.Lesovik V.S., Frolova M.A., Ayzenshtadt A.M. Surface activity of rocks [Poverkhnostnaya aktivnost' gornykh porod]. Stroitel'nye Materialy. 2013. No. 11. Pp. 71–73. EDN: RKXZQX. (rus)

16.Danilov V.E., Korolev E.V., Ayzenshtadt A.M., Strokova V.V. Features of the calculation of free energy of the surface based on the model for interfacial interaction of Owens–Wendt–Rabel–Kaelble [Osobennosti rascheta svobodnoy energii poverkhnosti na osnove modeli mezhfaznogo vzaimodeystviya Ounsa–Vendta–Rabelya–K'el'ble]. Stroitel'nye Materialy. 2019. No. 11. Pp. 66–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-776-11-66-72. (rus)

17.Korolev E.V., Grishina A.N., Pustovgar A.P. Surface tension in structure formation of materials: significance, calculation and application [Poverkhnostnoe natyazhenie v strukturoobrazovanii materialov. Znachenie, raschet i primenenie]. Stroitel'nye Materialy. 2017. No. 1–2. Pp. 104–109. EDN: XXIHWL. (rus)

18.Frolova M.A., Tutygin A.S., Ayzenshtadt A.M., Lesovik V.S., Makhova T.A., Pospelova T.A. Criterion for evaluating the energy properties of surfaces [Kriteriy otsenki energeticheskikh svoystv poverkhnosti]. Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2011. No. 2(4). Pp. 120–125. EDN: OWOOPZ. (rus)

19.Ravdel' A.A., Ponomareva A.M. (Eds.) Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin [Brief reference book of physicochemical quantities]. 10th ed. Saint Petersburg, Ivan Fedorov Publ., 2003. 240 p. (rus)

20.Zuev V.V., Potseluev L.N., Goncharov Yu.D. Kristalloenrgetika kak osnova otsenki magnezial'nykh svoystv tverdotel'nykh materialov (vklyuchaya magnezial'nye tsementy) [Crystal energetics as a basis for evaluating magnesian properties of solid materials (including magnesian cements)]. Saint Petersburg, ALFAPOL LLC Publ., 2006. 119 p. (rus)

21.Drozdyuk T.A., Ayzenshtadt A.M., Pershin Z.A., Danilov V.E. Fine-grained concrete with the addition of highly dispersed brick scrap powder [Melkozernistyy beton s dobavkoy vysokodispersnogo poroshka kirpichnogo boya]. Stroitel'nye Materialy. 2024. No. 9. Pp. 30–35. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-828-9-30-35. (rus)

Information about the author

Pershin, Zakhar A. Postgraduate student. E-mail: pershin.z@edu.narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Embankment, 17.

Ayzenshtadt, Arkady M. DSc, Professor. E-mail: a.isenshtadt@narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Embankment, 17.

Makhova, Tatiana A. PhD, Assistant professor. E-mail: t.mahova@narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Embankment, 17.

Pozhilov, Mikhail A. Master student. E-mail: pozhilov.m@edu.narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Embankment, 17.

Received 28.05.2026

Для цитирования:
Першин З.А., Айзенштадт А.М., Махова Т.А., Пожилов М.А. Использование энергетических параметров для характеристики процесса механоактивации порошков из кирпичного боя. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 9. С. 28–36. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-28-36

For citation:
Pershin Z.A., Ayzenshtadt A.M., Makhova T.A., Pozhilov M.A. Energy parameters for characterization of mechanical activation of brick waste powders. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 9. Pp. 28–36. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-28-36