

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-19-27

**\*Шаманина А.В., Айзеништадт А.М., Кононова В.М., Данилов В.Е.**  
Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,  
Высшая инженерная школа  
\*E-mail: alexandra.shamanina@yandex.ru

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНОАКТИВАЦИИ КРЕМНЕЗЕМСОДЕРЖАЩИХ ГОРНЫХ ПОРОД

**Аннотация.** Горные породы различного химического и минералогического состава широко используются в качестве сырья в сфере промышленности строительных материалов. При этом предварительная механическая активация минерального сырья до тонкодисперсного состояния способствует изменению энергетического потенциала системы и оказывает влияние на склонность поверхности тонкодисперсной системы к трансформационным превращениям. Исследования физико-химической активности механоактивированных горных пород позволяют определить рациональные области использования минеральных компонентов. В работе представлены результаты оценки эффективности механоактивации кремнеземсодержащего сырья по значениям активности поверхности ( $k_s$ ), определяемой как отношение величины свободной поверхностной энергии к удельной массовой энергии атомизации. Тонкодисперсные порошки были получены путем помола на планетарной шаровой мельнице до разной величины удельной поверхности кварцевого песка (1200–3000 м<sup>2</sup>/кг) и полиминерального песка (700–1335 м<sup>2</sup>/кг). Показано наличие функциональной зависимости активности поверхности от временных параметров механической активации исследуемых горных пород. Установлено, что механическая активация исходного сырья при оптимальном времени его помола позволяет достичь заданной величины активности поверхности. Параметр  $k_s$  рекомендовано использовать в качестве критерия для оценки эффективности процесса механической активации кремнеземсодержащих горных пород.

**Ключевые слова:** механоактивация, поверхностное натяжение, активность поверхности, свободная поверхностная энергия, удельная поверхность, кремнеземсодержащее сырье, кварцевый песок.

**Введение.** Перспективным направлением в области модификации строительных материалов из древесины является искусственное окаменение, технология которого заключается в обработке древесных материалов растворимым комплексом, повышающим устойчивость к гниению, воздействию биологических организмов и увеличивающим прочностные свойства материалов из растительного сырья [1]. Основой управляемого процесса минерализации древесной матрицы является использование органо-минерального двухкомпонентного растворимого комплекса «арабиногалактан-кварцсодержащий полиминеральный песок» [2]. Структурообразование и химическая активность данного соединения во многом определяется активностью кремнеземсодержащего сырья [3]. При этом минеральный компонент предварительно подвергается механическому дроблению до тонкодисперсного состояния, при этом вводимая в систему энергия (численно равная работе измельчения) изменяет энергетический потенциал получаемого порошкового материала [4–6].

Исследования показали, что с точки зрения нанотехнологического подхода, склонность поверхности тонкодисперсной системы к трансформационным превращениям можно оценить исходя из термодинамической характеристики энергетического состояния этой системы [7–10].

Полученные энергетические характеристики механоактивированного кремнеземсодержащего сырья позволили сделать вывод о возможности использования диспергированных горных пород в качестве компонентов строительных материалов [11–14].

При выборе минерального сырья целесообразно в качестве критериев отбора использовать факторы, учитывающие природные условия процесса формирования дисперсной системы и техногенные условия, зависящие от параметров механического воздействия [15]. В данной работе в качестве такого критерия используется показатель активности поверхности тонкодисперсных систем ( $k_s$ ) [11, 16], определяемый исходя из отношения величины свободной поверхностной энергии ( $E_s$ , Дж/кг) механоактивированной горной породы и удельной массовой энергии атомизации ( $E_m$ , Дж/кг). Нами в работах [17, 18] показано, что величину  $E_s$  можно рассчитать простым умножением свободной поверхностной энергии единицы поверхности (экспериментально определяемая величина поверхностного натяжения системы,  $\sigma$ , Дж/м<sup>2</sup>) на удельную поверхность порошка ( $S_{уд}$ , м<sup>2</sup>/кг). Удельная массовая энергия атомизации представляет собой отношение энергии атомизации ( $E_a$ , Дж) к молярной массе вещества, составляющего горную породу. Энергия

атомизации, в свою очередь, рассчитывается исходя из стандартных энтальпий образования химических соединений, составляющих анализируемые минеральные образы [11]. Значения энергетических макрохарактеристик сырьевых материалов ( $E_m$ ), исследуемых в данной работе, приведены в [19, 20].

**Материалы и методы.** На данном этапе исследования в качестве исходного сырьевого материала были выбраны кварцевый песок и полиминеральный песок месторождения «Краснофлотский-Запад» (г. Архангельск), основными порообразующими минералами которого являются кварц (74 %) и альбит (17 %).

Химический состав исходных образцов определяли по результатам рентгенофлуоресцентного анализа, выполненного с помощью прибора ПРФА «МетЭксперт». Образцы механически активировали до получения разной величины площади удельной поверхности путем сухого измельчения в планетарно-шаровой мельнице Retsch PM100 при скорости вращения ротора 420 об/мин. Исходный кварцевый песок диспергировали в течение 15, 25, 30 и 45 минут. Песок месторождения «Краснофлотский-Запад» измельчали 15, 30, 40, 45 и 60 минут до получения значений удельной поверхности близких к кварцевому порошку. Удельную поверхность полученных тонкодисперсных порошков определяли на анализаторе Autosorb-iQ-MP.

Для исследований из полученных порошков на гидравлическом прессе ПЛГ-20 были изготовлены образцы-запрессовки диаметром 30 мм при воздействии в течение 2 минут фиксированного избыточного усилия 2, 4, 8, 12 и 16 тонн. Определение значений поляризационной ( $\sigma_s^p$ ) и дисперсионной ( $\sigma_s^d$ ) составляющей поверхностного натяжения ( $\sigma_s$ ) определяли методом ОВРК (Оунса-Вендта-Рабеля-Къельбле). Эксперимен-

тальные значения краевого угла смачивания поверхностей образцов-запрессовок рабочими жидкостями с известными поляризационными и дисперсионными составляющими поверхностного натяжения (вода, глицерин, декан) были определены с помощью гониометра DSA-20E (EasyDrop).

Показатель активности поверхности дисперсных систем ( $k_s$ ) определен с учетом значений удельной массовой энергии атомизации и свободной поверхностной энергии механоактивированной горной породы посредством выражения:

$$k_s = \frac{E_s}{E_m} \quad (1)$$

Значение величины свободной поверхностной энергии тонкодисперсных порошков рассчитывалось с помощью выражения:

$$E_s = \sigma \cdot S_{уд} \quad (2)$$

где  $S_{уд}$ , м<sup>2</sup>/кг – площадь удельной поверхности порошка;

$\sigma$ , Дж/м<sup>2</sup> – поверхностное натяжение (численно равно свободной поверхностной энергии единицы поверхности).

Значения удельной массовой энергии атомизации образцов рассчитаны исходя из стандартных энтальпий образования химических соединений, составляющих минералы анализируемой горной породы.

**Основная часть.** Минеральный состав показал, что исследуемый образец кварцевого песка содержит (в пересчете на оксиды) 98,3 % SiO<sub>2</sub>, в качестве примесей были обнаружены оксиды железа и титана. Исследуемый образец песка месторождения «Краснофлотский-Запад» содержит 91,35 % SiO<sub>2</sub>, экспериментально определенный состав песка (в пересчете на оксиды) представлен в таблице 1. Высокое содержание в составе образца оксида кремния (IV) позволяет сделать вывод о возможности его использования в качестве компонента бетонной смеси.

Таблица 1

**Минеральный состав песка месторождения «Краснофлотский-Запад»**

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Na <sub>2</sub> O
91,35	5,06	0,74	0,65	0,26	0,04	0,36	0,02	0,04	0,02	1,37

Результаты определения поверхностного натяжения ( $\sigma_s$ , Дж/м<sup>2</sup>) исследуемых образцов-запрессовок, изготовленных при воздействии различной избыточной нагрузки на порошки разной степени диспергирования, показали, что увеличение времени механической активации сопровождается ростом величины поверхностного натяжения опытных образцов. Для кварцевого песка увеличение значений данного параметра наблюдается до критического времени помола, равного 30 мин, при длительности помола более 30 мин

происходит снижение величины этого показателя. Для природного полиминерального песка возрастание поверхностного натяжения от времени помола имеет линейный характер во всем измеряемом диапазоне удельных поверхностей.

Полученные экспериментально значения краевых углов смачивания ( $\theta$ ) рабочими жидкостями опытных образцов и рассчитанные на их основе значения поляризационной ( $\sigma_s^p$ ) и дисперсионной ( $\sigma_s^d$ ) составляющих поверхностного

натяжения и суммарная их величина ( $\sigma_s$ ) приведены в таблицах 2 и 3 для кварцевого песка и песка месторождения «Краснофлотский-Запад» соответственно. Установлено, что увеличение усилия прессования опытных образцов сопровождается снижением значений краевых углов смачивания. На наш взгляд, это объясняется с одной стороны усилением дисперсионного взаимодействия между тонкодисперсными частицами полученных порошковых материалов (увеличение дисперсионной составляющей  $\sigma$ ), приводящего к образованию более однородного поверх-

ностного слоя. С другой – уменьшением количества активных центров поверхности, энергетически способствующих проявлению адсорбционных сил взаимодействия капель рабочей жидкости с анализируемой поверхностью (уменьшение поляризационной составляющей  $\sigma$ ). Поверхностное натяжение порошков ( $\sigma_{s0}$ ) из сырьевых материалов для заданного времени измельчения определяли путем экстраполяции линейных зависимостей суммарного поверхностного натяжения, полученного для образцов под избыточной нагрузкой ( $p$ ) на значение  $p=0$ .

Таблица 2

**Экспериментальные и расчетные данные для образцов-запрессовок кварцевого песка**

Время по- мола, мин	Усилие прессования, т	Краевые углы смачивания, $\theta_{cp} \pm 0,1, ^\circ$			Поверхностное натяжение, мДж/м <sup>2</sup>		
		декан	глицерин	вода	$\sigma_s^p$	$\sigma_s^d$	$\sigma_s$
0	0	–	–	–	–	–	67,53
	2	12,0	20,5	19,1	45,32	22,12	67,43
	4	12,0	20,1	19,4	45,21	22,17	67,38
	8	11,9	19,6	19,9	45,02	22,26	67,28
	12	11,9	18,7	20,7	44,72	22,39	67,11
	16	10,6	18,4	21,3	44,38	22,55	66,93
15	0	–	–	–	–	–	67,58
	2	11,7	20,4	19,0	45,33	22,14	67,47
	4	11,7	20,0	19,2	45,27	22,19	67,45
	8	11,5	19,5	19,8	45,03	22,29	67,32
	12	11,3	18,6	20,6	44,71	22,43	67,15
	16	10,3	18,3	21,2	44,40	22,57	66,97
25	0	–	–	–	–	–	68,96
	2	11,6	16,1	15,4	46,54	22,35	68,89
	4	11,5	16,3	21,6	44,37	22,66	67,03
	8	11,4	16,2	23,8	43,39	22,87	66,26
	12	11,1	16,0	28,2	41,22	23,32	64,54
	16	10,1	15,9	29,7	40,36	23,55	63,91
30	0	–	–	–	–	–	71,12
	2	9,8	12,0	12,8	47,30	22,50	69,81
	4	9,7	13,0	21,7	44,23	23,02	67,25
	8	8,9	12,4	30,5	39,90	23,93	63,83
	12	7,8	11,8	35,9	36,11	24,81	60,92
	16	7,3	11,2	38,0	35,36	24,76	60,13
45	0	–	–	–	–	–	68,90
	2	14,4	17,9	16,0	46,66	21,95	68,61
	4	12,2	14,2	17,3	46,09	22,46	68,55
	8	9,9	12,8	18,8	45,40	22,80	68,20
	12	7,9	11,8	19,2	45,14	22,99	68,13
	16	7,3	11,5	22,0	43,99	23,25	67,24

Результаты экспериментального определения энергетических характеристик поверхности исследуемых механоактивированных порошков

и рассчитанные на основании выражения (1) значения активности поверхности ( $k_s$ ) приведены в таблице 4 для кварцевого песка и в таблице 5 для песка месторождения «Краснофлотский-Запад».

Таблица 3

**Экспериментальные и расчетные данные для образцов-запрессовок песка месторождения «Краснофлотский-Запад»**

Время по- мола, мин	Усилие прессования, т	Краевые углы смачивания, $\theta_{cp} \pm 0,1, ^\circ$			Поверхностное натяжение, мДж/м <sup>2</sup>		
		декан	глицерин	вода	$\sigma_s^p$	$\sigma_s^d$	$\sigma_s$
15	0	–	–	–	–	–	69,22
	2	14,1	19,9	13,1	47,45	21,66	69,11
	4	14,0	18,2	13,5	47,37	21,82	69,19
	8	12,7	17,4	13,8	47,18	22,00	69,18
	12	11,4	16,0	15,2	46,68	22,27	68,96
	16	11,2	14,6	15,8	46,50	22,42	68,92
30	0	–	–	–	–	–	69,12
	2	14,6	19,8	13,8	47,31	21,66	68,97
	4	13,9	17,7	13,9	47,25	21,89	69,15
	8	11,8	16,7	14,0	47,06	22,13	69,19
	12	11,4	15,5	15,0	46,75	22,30	69,05
	16	11,2	14,3	15,9	46,47	22,44	68,92
40	0	–	–	–	–	–	69,32
	2	14,4	19,1	12,8	47,58	21,68	69,26
	4	13,8	16,5	14,1	47,21	22,00	69,21
	8	13,5	15,1	15,0	46,94	22,17	69,10
	12	13,0	14,6	16,0	46,59	22,30	68,88
	16	12,4	13,3	16,4	46,42	22,45	68,87
45	0	–	–	–	–	–	70,17
	2	14,2	16,1	9,9	48,29	21,81	70,10
	4	13,7	14,8	12,3	47,71	22,04	69,75
	8	13,3	14,4	14,6	47,05	22,21	69,26
	12	13,1	13,8	15,7	46,70	22,32	69,02
	16	12,1	15,6	16,3	46,40	22,32	68,71

Таблица 4

**Энергетические характеристики поверхности порошков кварцевого песка**

t, мин	$S_{уд}, м^2/кг$	$\sigma_{s0}, Дж/м^2$	$E_m, кДж/кг$	$E_s, Дж/кг$	$k_s \cdot 10^6$
0	1200	$67,53 \cdot 10^{-3}$	33,2 $\cdot 10^3$	81,0	2,44
15	2370	$67,58 \cdot 10^{-3}$		160,2	4,83
25	2690	$68,96 \cdot 10^{-3}$		185,5	5,59
30	3000	$71,12 \cdot 10^{-3}$		213,4	6,43
45	1570	$68,90 \cdot 10^{-3}$		108,2	3,25

Таблица 5

**Энергетические характеристики поверхности порошков песка месторождения «Краснофлотский-Запад»**

t, мин	$S_{уд}, м^2/кг$	$\sigma_{s0}, Дж/м^2$	$E_m, кДж/кг$	$E_s, Дж/кг$	$k_s \cdot 10^6$
0	–	–	30,4 $\cdot 10^3$	–	0,25
15	700	$69,22 \cdot 10^{-3}$		48,46	1,59
30	950	$69,12 \cdot 10^{-3}$		65,66	2,16
40	890	$69,32 \cdot 10^{-3}$		61,70	2,03
45	795	$70,17 \cdot 10^{-3}$		55,78	1,83
60	1335	$70,50 \cdot 10^{-3}$		94,12	3,09

Зависимость активности поверхности образцов от времени механической активации представлена функцией  $k_s=f(t)$  и приведена на ри-

сунке 1. Эта зависимость для исследуемых песков имеет схожий характер до времени помола, ограниченного 45 мин и подчиняется уравнению полинома второй степени общего вида:

$$y = -a_1x^2 + a_2x + a \quad (3)$$

где  $a$  – свободный член уравнения, численно равный значениям активности поверхности сырьевых материалов (для кварцевого песка  $2,44 \cdot 10^{-6}$ , для полиминерального песка  $0,25 \cdot 10^{-6}$ ). Коэффициент достоверности аппроксимации 0,91 и 0,97 для порошков кварцевого песка и природного полиминерального песка соответственно.

При этом данные зависимости имеют экстремум при времени помола порядка 30 мин, этот

факт позволяет сделать вывод, что это время механической активации является оптимальным для исследуемых образцов. При продолжительности помола более 30 мин происходит снижение показателя активности поверхности, что на наш взгляд объясняется наличием избытка свободной поверхностной энергии ( $E_s$ ) и стремлением тонкодисперсной системы уменьшить ее за счет самопроизвольной агрегации твердых частиц механически активированных порошков при увеличении времени механической активации.

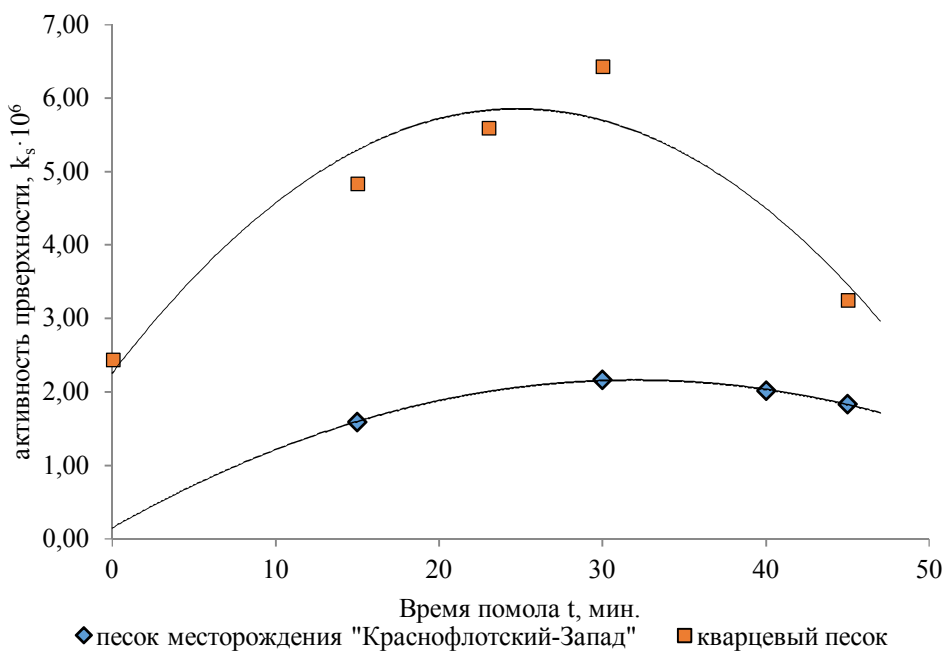


Рис. 1. Функциональные зависимости  $k_s=f(t)$  для серий экспериментов с различным временным интервалом помола (до 45 минут)

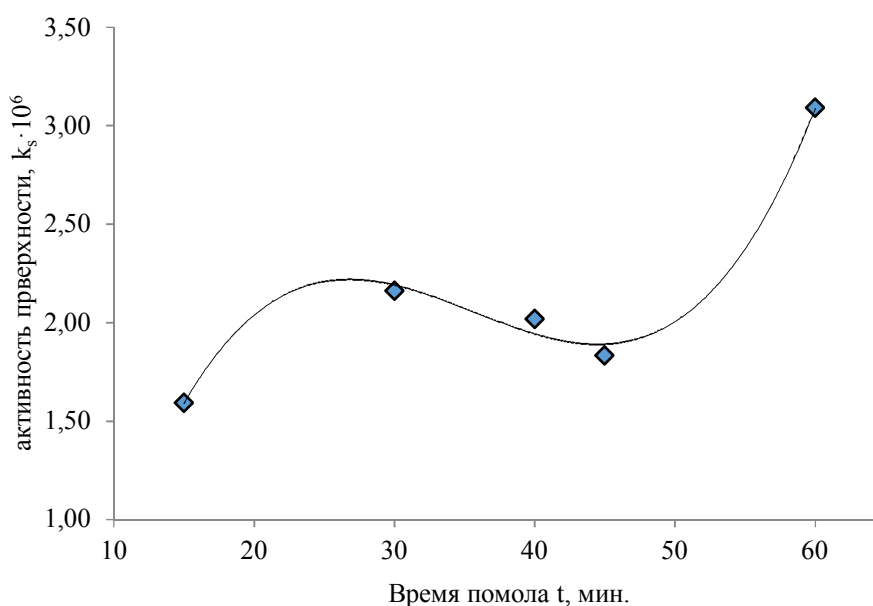


Рис. 2. Функциональная зависимость  $k_s=f(t)$  для природного полиминерального песка с различным временным интервалом помола (до 60 минут)

Следует отметить, что увеличение времени механического диспергирования полиминерального песка месторождения «Краснофлотский-Запад» до 60 мин приводит к значительному увеличению значений удельной поверхности  $S_{уд}$ . Функциональная зависимость  $k_s=f(t)$  для всего диапазона измерений представлена на рисунке 2. Данный факт может быть связан со сложным полиминеральным составом (табл. 1) и, как следствие, различной размолоспособностью минеральных составляющих исследуемого песка. Увеличение свободной поверхностной энергии при времени помола более 45 мин связано с механической активацией сопутствующих минералов, характерных для данного месторождения. Вместе с тем, отмеченный эффект может являться предметом отдельного изучения механизма процесса механического диспергирования полиминеральных песков.

Таким образом, для тонкодисперсного кварцевого порошка значение активности поверхности при оптимальном времени помола в 3 раза превышает показатель активности исходного кварцевого песка. Для механоактивированного песка месторождения «Краснофлотский-Запад» активность поверхности превышает данный показатель в сравнении с исходным песком в 8 раз. Результаты проведенных исследований показали, что путем механической активации исходного сырьевого материала можно достичь заданной величины активности поверхности.

**Выводы.** Установлено, что, оценивая эффективность механоактивации по значениям активности поверхности порошков, можно оптимизировать процесс, получая тонкодисперсные системы с заданной развитостью поверхности. Показано наличие функциональной взаимосвязи между  $k_s$  и временными параметрами механического диспергирования горных пород. При этом функциональная зависимость  $k_s=f(t)$  имеет схожий характер для кварцевого песка и песка месторождения «Краснофлотский-Запад», подчиняясь уравнению полинома второй степени и характеризуется экстремумом при времени помола порядка 30 мин. Механическая активация исходного сырья при оптимальном времени его помола позволяет увеличить показатель активности поверхности в 3 раза от исходного значения для кварцевого песка и в 8 раз для песка месторождения «Краснофлотский-Запад»

*Источник финансирования. Грант РФФИ 18-43-292002.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kiliusheva N.V., Ayzenshtadt A.M., Danilov V.E., Stenin A.A. Organic-mineral modifier for pet-

rification of wood // 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconferences SGEM 2018: Nano, Bio and Green- Technologies for a Sustainable Future. 2018. №18. Pp. 385–392

2. Kilyusheva N.V., Danilov V.E., Ayzenshtadt A.M., Belyaev A.O. Compounding and technological methods for increasing the efficiency of wood matrix mineralization // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1697. 012242.

3. Danilov V.E., Ayzenshtadt A.M., Kilyusheva N.V., Makhova T.A., Belyaev A.O. Colloid chemical aspects accelerated artificial petrification of wood. // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1400. 077053.

4. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В., Нефедьев А.П., Худовекова Е.А., Бурьянов А.Ф., Фишер Х.Б. Активированные наполнители для гипсовых и ангидритовых смесей // Строительные материалы. 2018. № 8. С. 14–17.

5. Худякова Л.И., Войлошников О.В., Котова И.Ю. Влияние механической активации на процесс образования и свойства композиционных вяжущих материалов // Строительные материалы. 2015. №3. С. 37–39.

6. Кара К.А. Изучение размолоспособности кварцсодержащих добавок как компонента композиционных вяжущих // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. № 5. С. 45–52.

7. Строкова В.В., Нелюбова В.В., Попов А.Л. Исследование активности кремнеземсодержащего сырья с учетом его состава и способа механоактивации // Международная научно-практическая конференция "Наукоемкие технологии и инновации" (XXII научные чтения). Сборник докладов. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2016. С. 295–299.

8. Вешнякова Л.А., Фролова М.А., Айзенштадт А.М., Лесовик В.С., Михайлова О.Н., Махова Т.А. Оценка энергетического состояния сырья для получения строительных материалов // Строительные материалы. 2012. №10. С. 53–55.

9. Абрамовская И.Р., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Вешнякова Л.А., Тутьгин А.С. Энергетика высокодисперсных композитов горных пород // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2013. № 3. С. 56–65.

10. Вешнякова Л.А., Айзенштадт А.М., Фролова М.А. Оценка поверхностной активности высокодисперсного сырья для композиционных строительных материалов // Физика и химия обработки материалов. 2015. № 2. С. 68–72.

11. Абрамовская И.Р., Айзенштадт А.М., Лесовик В.С., Вешнякова Л.А., Фролова М.А., Казлитин С.А. Расчет энергоемкости горных пород –

как сырья для производства строительных материалов // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 10. С. 23–25.

12. Нецвет Д.Д., Нелюбова В.В., Строкова В.В. Композиционное вяжущее с минеральными добавками для неавтоклавных пенобетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 4. С. 122–131.

13. Воронов В.В. Композиционные вяжущие с применением опоковидного мергеля для производства пенобетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №1. С. 21–27.

14. Voitovich E.V., Cherevatova A.V., Zhernovsky I.V., Strokova V.V., Chikileva E.N., Fischer H.-B., Makarova N.V. Influence of nanosized silica component on physical and mechanical properties of a composite gypsum binder // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 584–586. Pp. 1756–1760.

15. Лесовик В.С., Фомина Е.В., Айзенштадт А.М. Некоторые аспекты техногенного метасоматоза в строительном материаловедении // Строительные материалы. 2019. № 1-2. С. 100–106.

16. Вешнякова Л.А., Дроздук Т.А., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Тутьгин А.С. Поверхностная активность кремнесодержащих горных пород // Материаловедение. 2016. № 5. С. 45–48.

17. Ролдунгин В.И. Физикохимия поверхности // Долгопрудный: Издательство Интеллект, 2008. 508 с.

18. Морозова М.В. Активность поверхности высокодисперсных систем на основе сапонит-содержащего отхода алмазодобывающей промышленности // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №2. С. 5–9.

19. Морозова М.В., Акулова М.В., Фролова М.А., Щепочкина Ю.А. Определение энергетических параметров песков на примере месторождений Архангельской области // Материаловедение. 2020. №9. С. 45–48.

20. Зуев В.В., Поцелуева Л.Н., Гончаров Ю.Д. Кристаллоэнергетика как основа оценки свойств твердотельных материалов. СПб. 2006. 139 с.

#### Информация об авторах

**Шаманина Александра Валерьевна**, аспирант кафедры композиционных материалов и строительной экологии. E-mail: alexandra.shamanina@yandex.ru. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Высшая инженерная школа; наб. Северной Двины, 17, Архангельск, 163002, Россия.

**Айзенштадт Аркадий Михайлович**, доктор химических наук, профессор кафедры композиционных материалов и строительной экологии. E-mail: a.isenshtadt@narfu.ru. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Высшая инженерная школа; наб. Северной Двины, 17, Архангельск, 163002, Россия.

**Кононова Виолетта Михайловна**, студент кафедры композиционных материалов и строительной экологии. E-mail: viole-kononova@yandex.ru. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Высшая инженерная школа; наб. Северной Двины, 17, Архангельск, 163002, Россия.

**Данилов Виктор Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры композиционных материалов и строительной экологии. E-mail: v.danilov@narfu.ru. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Высшая инженерная школа; наб. Северной Двины, 17, Архангельск, 163002, Россия.

Поступила 26.03.2021 г.

© Шаманина А.В., Айзенштадт А.М., Кононова В.М., Данилов В.Е., 2021

**\*Shamanina A.V., Ayzenstadt A.M., Kononova V.M., Danilov V.E.**

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

*Graduate School of Engineering*

*\*E-mail: alexandra.shamanina@yandex.ru*

## ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF MECHANICAL ACTIVATION OF SILICA-CONTAINING ROCKS

**Abstract.** Rocks of various chemical and mineralogical composition are widely used as raw materials in the construction materials industry. At the same time, preliminary mechanical activation of mineral raw materials to a finely dispersed state contributes to a change in the energy potential of the system and affects the tendency of the surface of a finely dispersed system to transformations. Studies of the physicochemical activity of mechanically activated rocks allow to determine the rational areas of use of mineral components. The paper presents the results of evaluating the efficiency of mechanical activation of silica-containing raw materials by

the values of surface activity ( $k_s$ ), defined as the ratio of the value of the free surface energy to the specific mass energy of atomization. Fine powders are obtained by grinding in a planetary ball mill to a different specific surface area of quartz sand (1200–3000 m<sup>2</sup>/kg) and polymineral sand (700–1335 m<sup>2</sup>/kg). The presence of a functional dependence of the surface activity on the time parameters of mechanical activation of the studied rocks is shown. The mechanical activation of the feedstock at the optimal time of its grinding makes it possible to achieve a given value of the surface activity. It is recommended to use the  $k_s$  parameter as a criterion for assessing the efficiency of the process of mechanical activation of silica-containing rocks.

**Keywords:** mechanical activation, surface tension, surface activity, free surface energy, specific surface area, silica-containing raw material, quartz sand.

## REFERENCES

1. Kiliusheva N.V., Ayzenshtadt A.M., Danilov V.E., Stenin A.A. Organic-mineral modifier for petrification of wood. 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconferences SGEM 2018: Nano, Bio and Green- Technologies for a Sustainable Future. 2018. No. 18. Pp. 385–392
2. Kilyusheva N.V., Danilov V.E., Ayzenshtadt A.M., Belyaev A.O. Compounding and technological methods for increasing the efficiency of wood matrix mineralization. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1697. 012242.
3. Danilov V.E., Ayzenshtadt A. M., Kilyusheva N.V., Makhova T. A., Belyaev A.O. Colloid chemical aspects accelerated artificial petrification of wood. Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1400. 077053.
4. Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodezhnaya E.V., Nefed'ev A.P., Hudovekova E.A., Bur'yanov A.F., Fisher H.B. Activated fillers for gypsum and anhydrite mixtures [Aktivirovannye napolniteli dlya gipsovyyh i angidritovyh smesey]. Construction Materials. 2018. No. 8. Pp. 14–17. (rus)
5. Hudyakova L.I., Vojloshnikov O.V., Kotova I.Yu. Effect of mechanical activation on the formation process and properties of composite binders [Vliyaniye mekhanicheskoy aktivatsii na process obrazovaniya i svoystva kompozitsionnykh vyazhushchih materialov]. Construction Materials. 2015. No. 3. Pp. 37–39. (rus)
6. Kara K.A. Study of grindability of quartz-containing additives as component binders [Izucheniye razmolosposobnosti kvarcsoderzhashchih dobavok kak komponenta kompozitsionnykh vyazhushchih]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 5. Pp. 45–52. (rus)
7. Strokova V.V., Nelyubova V.V., Popov A.L. Investigation of the activity of silica-containing raw materials, taking into account its composition and method of mechanical activation [Issledovaniye aktivnosti kremnezemsoderzhashchego syr'ya s uchetom ego sostava i spozoba mekhanoaktivatsii]. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya "Naukoemkie tekhnologii i innovatsii" (XXII nauchnye chteniya). Sbornik dokladov. BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. Pp. 295–299. (rus)
8. Veshnyakova L.A., Frolova M.A., Ayzenshtadt A.M., Lesovik V.S., Mikhailova O.N., Makhova T. A. Assessment of the energy state of raw materials for the production of building materials [Ocenka energeticheskogo sostoyaniya syr'ya dlya polucheniya stroitel'nykh materialov]. Construction Materials. 2012. No. 10. Pp. 53–55. (rus)
9. Abramovskaya I.R., Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A., Veshnyakova L.A., Tutygin A.S. Energy of highly dispersed composites of rocks [Energetika vysokodispersnykh kompozitov gornyyh porod]. Nanotechnologies in construction: scientific online journal. 2013. No. 3. Pp. 56–65. (rus)
10. Veshnyakova L.A., Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A. Assessment of surface activity of highly dispersed raw materials for composite building materials [Ocenka poverhnostnoy aktivnosti vysokodispersnogo syr'ya dlya kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov]. Physics and Chemistry of Materials Treatment. 2015. No. 2. Pp. 68–72. (rus)
11. Abramovskaya I.R., Ayzenshtadt A.M., Lesovik V.S., Veshnyakova L.A., Frolova M.A., Kazlitin S. A. Calculation of the energy intensity of rocks – as raw materials for the production of building materials [Raschet energoemkosti gornyyh porod – kak syr'ya dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov]. Industrial and civil construction. 2012. No. 10. Pp. 23–25. (rus)
12. Netsvet D.D., Nelyubova V.V., Strokova V.V. Composite binder with mineral additives for non-autoclave foam concrete [Kompozitsionnoe vyazhushchee s mineral'nymi dobavkami dlya neavtoklavnykh penobetonov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 4. Pp. 122–131. (rus)
13. Voronov V.V. Composite binders with the use of opoka-like marl for the production of foam concrete [Kompozitsionnye vyazhushchie s primeneniem opokovidnogo mergelya dlya proizvodstva penobetona]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. №1. Pp. 21–27. (rus)
14. Voitovich E.V., Cherevatova A.V., Zhernovskiy I.V., Strokova V.V., Chikileva E.N., Fischer H.-B., Makarova N.V. Influence of nanosized silica component on physical and mechanical properties of a composite gypsum binder. Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 584–586. Pp. 1756–1760.



15. Lesovik V.S., Fomina E.V., Ayzenshtadt A. M. Some aspects of technogenic metasomatism in building materials science [Nekotorye aspekty tekhnogenogo metasomatoza v stroitel'nom materilovedenii]. Construction Materials. 2019. No. 1-2. Pp. 100–106. (rus)

16. Veshnyakova L.A., Drozdyuk T.A., Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A., Tutygin A.S. Surface activity of siliceous rocks [Poverhnostnaya aktivnost' kremnesoderzhashchih gornyh porod]. Materials Science. 2016. No. 5. Pp. 45–48. (rus)

17. Roldungin V.I. Physicochemistry of the surface [Fizikohimiya poverhnosti]. Dolgoprudny: Intellect Publishing House. 2008. 508 p. (rus)

18. Morozova M.V. Surface activity of highly dispersed systems based on saponite-containing

waste from the diamond mining industry [Aktivnost' poverhnosti vysokodispersnyh sistem na osnove saponit-soderzhashchego othodaalmazodobyvayushchej promyshlennosti]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 2. Pp. 5–9. (rus)

19. Morozova M.V., Akulova M.V., Frolova M.A., Shchepochkina Yu. A. Determination of energy parameters of sands on the example of deposits of the Arkhangelsk region [Opredelenie energeticheskikh parametrov peskov na primere mestorozhdenij Arhangel'skoj oblasti]. Materials Science. 2020. No. 9. Pp. 45–48. (rus)

20. Zuev V.V., Potselueva L.N., Goncharov Yu.D. Crystal energy as a basis for assessing the properties of solid-state materials [Kristalloenergetika kak osnova ocenki svoystv tverdotel'nyh materialov]. St. Petersburg. 2006. 139 p. (rus)

#### *Information about the authors*

**Shamanina, Aleksandra V.** Postgraduate student. E-mail: alexandra.shamanina@yandex.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Graduate School of Engineering. Northern Dvina Emb. 17, Arkhangelsk, 163002, Russia.

**Ayzenshtadt, Arcady M.** DSc, Professor. E-mail: a.isenshtadt@narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov», Graduate School of Engineering. Northern Dvina Emb. 17, Arkhangelsk, 163002, Russia.

**Kononova, Violetta M.** Student. E-mail: viole-kononova@yandex.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Graduate School of Engineering. Northern Dvina Emb. 17, Arkhangelsk, 163002, Russia.

**Danilov, Victor E.** Assistant professor, PhD. E-mail: v.danilov@narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Graduate School of Engineering. Northern Dvina Emb. 17, Arkhangelsk, 163002, Russia.

*Received 26.03.2021*

#### **Для цитирования:**

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: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-19-27

#### **For citation:**

Shamanina A.V., Ayzenshtadt A.M., Kononova V.M., Danilov V.E. Estimation of the efficiency of mechanical activation of silica-containing rocks. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 5. Pp. 19–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-19-27