

УДК: 691.32
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/71.6
EDN: FTIGBH



Модель определения количества активированного вещества при механомагнитной активации

Р.А. Ибрагимов¹, Е.В. Королев²

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Одним из перспективных направлений повышения физико-механических свойств композиционных строительных материалов является механомагнитная активация минеральных компонентов в аппаратах вихревого слоя. Вместе с тем отсутствуют модели определения количества активированного вещества, образующегося в процессе механомагнитной обработки. *Цель работы* – разработка модели определения количества активированного вещества при механомагнитной активации в аппарате вихревого слоя. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- определена удельная поверхность исходных материалов и их изменение в процессе механомагнитной обработки;
- определено количество активированного вещества для разных полидисперсных материалов.

Результаты. Проведен анализ удельной поверхности минеральных компонентов как по методу воздухопроницаемости, так и по методу, предложенному Брунауэром, Эмметом и Теллером. Определены области когерентного рассеивания кристаллитов. Предложена модель определения количества активированного вещества при механомагнитной обработке. В основе модели предположение, что площади площадок каждой пирамиды (дефекта на поверхности частицы минерального компонента) соответствуют площади области когерентного рассеивания: верхняя площадка – площади после активационного воздействия, а нижняя площадка – до активации. При этом все пики (усечённые пирамиды) имеют одинаковую форму и размер. В соответствии с результатами расчета по предложенной методике показано, что количество активированного вещества повышается с увеличением продолжительности механомагнитной активации: для портландцемента до 10,3 %, для гипса – до 8,4 %, для известняка – до 4,1 %, для кварцевого порошка – до 33,5 %.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что для повышения эффективности механомагнитной активации в аппаратах вихревого слоя целесообразно использовать минеральные вещества, являющиеся парамагнетиками.

Ключевые слова: механомагнитная активация, модель, области когерентного рассеивания, парамагнетики, активированное вещество

Для цитирования: Ибрагимов Р.А., Королев Е. В. Модель определения количества активированного вещества при механомагнитной активации // Известия КГАСУ, 2025, № 1(71), с. 67-76, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/71.6, EDN: FTIGBH

Model for determining the amount of activated substance during mechanomagnetic activation

R.A. Ibragimov¹, E.V. Korolev²

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

²Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. *Problem statement.* One of the promising areas for improving the physical and mechanical properties of composite building materials is mechanomagnetic activation of mineral components in vortex layer devices. However, there are no models for determining the amount of activated substance formed during mechanomagnetic treatment. *The purpose of the work* is to develop a model for determining the amount of activated substance during mechanomagnetic activation in a vortex layer device. To achieve this goal, the following tasks were solved:

- the specific surface area of the initial materials and their change during mechanomagnetic treatment were determined;
- the amount of activated substance for different polydisperse materials was determined.

Results. The specific surface area of mineral components was analyzed using both the air permeability method and the BET method (proposed by Brunauer, Emmett and Teller). The coherent scattering regions (CSR) of crystallites were determined. A model for determining the amount of activated substance during mechanomagnetic treatment was proposed. The model is based on the assumption that the areas of each pyramid (a defect on the surface of a mineral component particle) correspond to the area of the CSR: the upper area corresponds to the area of the CSR after the activation effect, and the lower area corresponds to the area of the CSR before activation. In this case, all peaks (truncated pyramids) have the same shape and size. According to the calculation results using the proposed method, it is shown that the amount of the activated substance increases with increasing duration of mechanomagnetic activation: for Portland cement up to 10.3%, for gypsum - up to 8.4%, for limestone - up to 4.1%, for quartz powder - up to 33.5%.

Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry is that in order to increase the efficiency of mechanomagnetic activation in vortex layer devices, it is advisable to use mineral substances that are paramagnetic.

Keywords: mechanomagnetic activation, model, coherent scattering regions, paramagnets, activated substance.

For citation: Ibragimov R.A., Korolev E.V. Model for determining the amount of activated substance during mechanomagnetic activation // News of KSUAE, 2025, № 1(71), p. 67-76, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/71.6, EDN: FTIGBH

1. Введение

Одним из способов повышения физико-механических свойств композиционных строительных материалов является активация исходных компонентов [1]. По физическому способу воздействия активация имеет большое количество известных решений: механическое, ультразвуковое, магнитное, вихревое и т.д. [2]. Все перечисленные способы приводят к изменению поверхностных свойств и площади поверхности контактирующих веществ. Поверхностная энергия обрабатываемого вещества может оцениваться достаточно большим спектром известных методов [3]. Однако, практически отсутствуют исследования, посвященные определению количества вещества, которое преобразуется в результате физических воздействий. Такое вещество, обладающее отличающимися от исходного вещества структурой и свойствами, определяется как активированное вещество. При физической обработке (в данном случае можно рассматривать исключительно только механическую обработку) материала в

основном протекают два сопряженных процесса: 1) разрушение частиц, приводимое к росту дисперсности порошка; и 2) преобразование вещества, которое оценивается изменением поверхностных свойств. Естественно предположить, что такое преобразование структуры и свойств вещества обрабатываемого материала протекает с поверхности частиц к её центру. При этом важным является поверхностный слой преобразованного (активированного) вещества, так как его влияние на структурообразование композиционного материала является доминирующим [4].

Известно [5], что в результате механических, ультразвуковых, электромагнитных и другого рода воздействий кристаллы претерпевают объемные изменения: деформации кристаллической решетки, внутренние напряжения и разрывы сплошности. С целью определения размеров, фрактальности частиц применяют метод рентгенофазового анализа. Размеры областей когерентного рассеяния (ОКР) (размеры нанокристаллитов) определяют согласно классической формуле Дебая – Шеррера [6]:

$$\beta_D = \frac{K\lambda}{D\cos\theta}, \quad (1)$$

где β_D – интегральная ширина рефлексов на дифрактограмме; D – размеры кристаллитов (ОКР) (нм); K – фактор формы; λ – длина волны рентгеновского излучения (нм); $\cos\theta$ – косинус угла дифракции рентгеновских лучей.

В случае необходимости определения микронапряжений в материалах, имеющих сильнодеформированные кристаллы, применяют формулу Стокса [7]. Утверждается, что в основе любой технологии создания композиционных изделий – элементарные физико-химические процессы, для реализации которых молекулам вещества необходимо обладать пороговой энергией активации процесса [8]. В данной модели принято, что количество (концентрация) активных веществ пропорционально кинетики протекания гетерофазных процессов. В строительном материаловедении при создании композитов с направленным структурообразованием необходимо проводить количественную оценку образующегося активного вещества, в случае если такие композиты получены путем активационного воздействия. Существующие модели определения количества активированного вещества направлены на оценку активных форм O_2 с использованием кинетических моделей при измельчении в шаровой мельнице [9-10], либо при определении механизма активации пуццолановых добавок при измельчении [11-12]. Однако, практически отсутствуют модели определения количества активированного вещества при механомагнитной обработке в аппаратах вихревого слоя, количество исследований по которым в последнее время увеличивается [13-14].

Цель исследования – разработка модели определения количества активированного вещества при механомагнитной активации в аппарате вихревого слоя.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- определена удельная поверхность исходных материалов и их изменение в процессе механомагнитной обработки;
- определено количество активированного вещества для разных полидисперсных материалов.

2. Материалы и методы

При проведении исследований использованы следующие материалы:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5 Б Новотроицкого цементного завода, соответствующего требованиям ГОСТ 31108-2020;
- гипс строительный марки Г-5 БП (β -полугидрат) производства ЗАО «Самарский гипсовый комбинат», соответствующий ГОСТ 125-2018;
- кварцевый песок Камско-Устьинского месторождения, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736-2014;
- известняк Бондюжского месторождения (Республика Татарстан, г. Менделеевск). Наличие в составе используемого известняка карбонатов магния относит его к доломитизированным известнякам.

Удельная поверхность определялась методом воздухопроницаемости прибором ПСХ-9 ($S_{\text{ТОВ}}$). Площадь удельной поверхности по методу БЭТ (предложен Брунауэром, Эмметом и Теллером) ($S_{\text{БЭТ}}$) определялась анализатором площади поверхности и размера

пор Quantachrome Nova 1200e в соответствии с ISO 9277:2010, ISO 15901-2:2006, ISO 15901-3. Исходные данные указанных материалов представлены в таблице 1.

С целью проведения экспериментальных исследований применялся аппарат вихревого слоя (АВС) модель 297 производитель ООО «Регионметтранс». Рентгенограммы образцов искусственного камня снимались на автоматическом рентгеновском дифрактометре D2 Phaser (фирма-производитель Bruker AXS GmbH). В таблице 2 приведены размеры ОКР (размеры кристаллитов) в зависимости от вида материала и площади удельной поверхности.

Таблица 1

Исходные данные используемых материалов

Вид материала	Истинная плотность, кг/м ³	S _{ТОВ} , м ² /кг	d _{ср} , мкм	S _{БЭТ} , м ² /кг
Портландцемент	3100	340	5,57	865
Строительный гипс	2320	246	9,21	765
Известняк	2740	130	17,9	440
Кварцевый порошок	2650	20	162,4	254

Таблица 2

Размеры кристаллитов и содержание основных фаз

Вид материала	Исходный		S _{ТОВ} = 550 м ² /кг S _{БЭТ} = 1780 м ² /кг D _{ср} =3,43 мкм		S _{ТОВ} = 610 м ² /кг S _{БЭТ} = 2075 м ² /кг D _{ср} =3,09 мкм				
			Ld, нм	Содержание, %	Ld, нм	Содержание, %	Ld, нм	Содержание, %	
Портландцемент	Ld, нм	Содержание, %	Ld, нм	Содержание, %	Ld, нм	Содержание, %			
C ₃ S	120,3	50,5	98,9	52,4	94,9	53,1			
C ₂ S	32,8	25,1	28,4	25,7	27	26,1			
C ₃ A	53,2	4,1	53	3,6	52,7	3,0			
C ₄ AF	49,1	12,6	48,7	11,8	47,8	11,4			
Periclase	113	2,7	83,9	2,2	79,9	1,9			
Гипс	Исходный		S _{ТОВ} = 439 м ² /кг S _{БЭТ} = 1599 м ² /кг D _{ср} =5,16 мкм		S _{ТОВ} = 571 м ² /кг S _{БЭТ} = 2132 м ² /кг D _{ср} =3,96 мкм				
			CaSO ₄ ·0,5H ₂ O	86,7	76,1	65,4	64,3	57,9	50,6
			CaSO ₄	72,8	11,1	58,9	22,8	53,6	36,6
Известняк	Исходный		S _{ТОВ} = 215 м ² /кг S _{БЭТ} = 885 м ² /кг D _{ср} =10,8 мкм		S _{ТОВ} = 280 м ² /кг S _{БЭТ} = 1180 м ² /кг D _{ср} =8,2 мкм				
			MgO	96,9	19,8	88,4	18,6	81,6	18,1
			CaO	115,7	34,6	94,3	36,2	88,4	36,8
Кварцевый порошок	Исходный		S _{ТОВ} = 82 м ² /кг S _{БЭТ} = 6780 м ² /кг D _{ср} =39,6 мкм		S _{ТОВ} = 105 м ² /кг S _{БЭТ} = 9860 м ² /кг D _{ср} =30,9 мкм				
			SiO ₂	55,7	92,30	50,7	93,20	47,3	93,10

Для определения уширения рефлексов на дифрактограммах использовали формулу:

$$\beta = \frac{1}{I_{max}} \int_{2\theta_1}^{2\theta_2} I(2\theta)d(2\theta), \quad (2)$$

где I_{max} – максимальная интенсивность. Профиль рентгенограммы для определения уширения рефлекса представлен на рисунке 1.

Профиль линии, описывающей размеры ОКР представлена функцией $M(2\theta)$. Тогда интегральное уширение составит:

$$\beta_D = \int M(2\theta)d(2\theta). \quad (3)$$

При активационном воздействии на частицы минеральных компонентов на поверхности последних образуются различного рода дефекты: трещины краевые дислокации, пики. Это приводит к изменению рельефа поверхности частицы. Предположим, что этот рельеф представлен пиками, которые представляют усечённые пирамиды (рисунок 2). Причём площади площадок каждой такой пирамиды соответствуют площади ОКР: верхняя площадка – площади ОКР после активационного воздействия (так как такое воздействие приводит к изменениям структуры кристаллов), а нижняя площадка – ОКР до активации (предполагается, что вещество не претерпело изменений). Также принимается, что все пики (усечённые пирамиды) имеют одинаковую форму и размер, а также основание и вершина пирамиды представлена квадратами с площадями $L_{d,0}^2$ и $L_{d,1}^2$, соответственно (здесь $L_{d,0}$ и $L_{d,1}$ – ОКР до и после активационного воздействия). Критерием для определения высоты пирамиды является равенство площадей поверхностей всех пиков, расположенных на частице, экспериментально установленной площади поверхности по методу БЭТ:

$$\bar{S}_1 = S_{h,1} N_h, \tag{4}$$

где \bar{S}_1 – площадь поверхности одной частицы, определённая экспериментально методом БЭТ; N_h – количество пиков; $S_{h,1}$ – площадь поверхности одного пика.

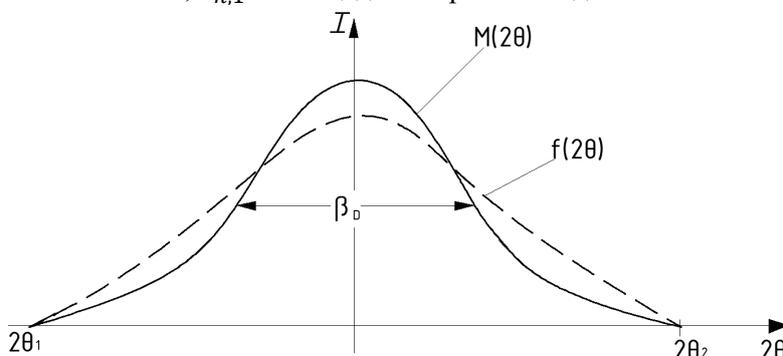


Рис. 1. Графическая иллюстрация определения уширения рефлекса (иллюстрация авторов)
 Fig. 1. Graphic illustration of the determination of reflex broadening (illustration by the authors)

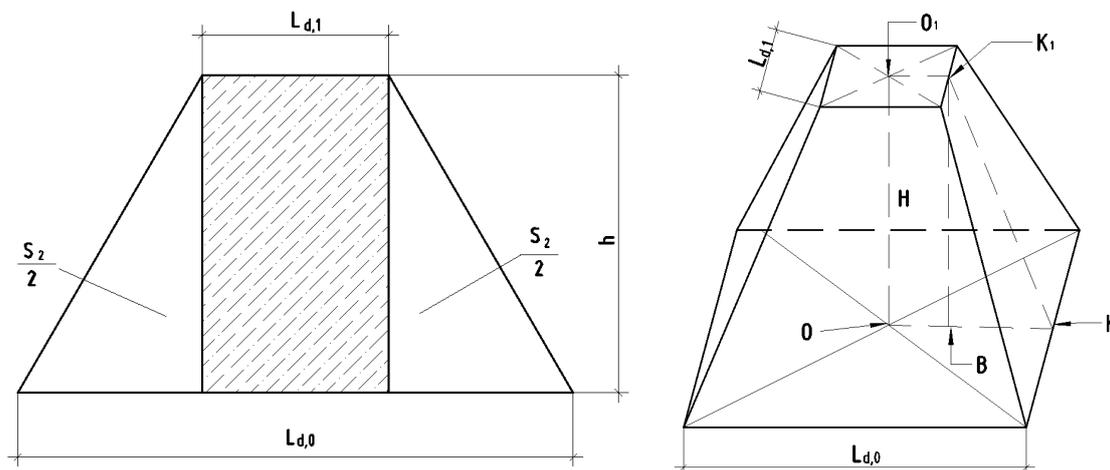


Рис. 2. Графическая иллюстрация к предлагаемой модели (иллюстрация авторов)
 Fig. 2. Graphic illustration of the proposed model (illustration by the authors)

Величину \bar{S}_1 можно вычислить по формуле:

$$\bar{S}_1 = \frac{S_{БЭТ}}{N_f} = \pi D_{cp}^2 \frac{S_{БЭТ}}{S_{ТОВ}}, \tag{5}$$

где N_f – количество частиц, равное:

$$N_f = \frac{6m_f}{\rho_f \pi D_{cp}^3}, \tag{6}$$

где m_f – масса частиц ($m_f = 1$ кг); ρ_f – плотность материала частиц.

Очевидно, величины N_h и $S_{h,1}$ зависят от геометрических размеров пирамиды. Площади вершины и основания пирамиды рассчитываются из экспериментальных данных, представленных в таблице 2. С учётом этого площадь поверхности одного пика будет равна:

$$S_{h,1} = 4L_{d,1}h + L_{d,1}^2, \quad (7)$$

где h – апофема усечённой пирамиды.

Определить величину апофемы можно с привлечением теоремы Пифагора. Из рисунка 2 следует, что:

$$h^2 = H^2 + \left(\frac{L_{d,0} - L_{d,1}}{2}\right)^2. \quad (8)$$

В формуле (7) неизвестной величиной является высота пирамиды H . Для её определения необходимо привлечение как формулы для определения объёма усечённой пирамиды, так и формулы для вычисления объёма слоя активированного вещества. Объём усечённой пирамиды равен:

$$V_{h,1} = \frac{1}{3}H(L_{d,1}^2 + L_{d,0}^2 + L_{d,1}L_{d,0}). \quad (9)$$

Объём слоя активированного вещества, представленного усечёнными пирамидами, будет равен:

$$V_{h,1}N_h = \frac{\pi}{6}D_{cp}^3 \left(1 - \left(1 - \frac{2h_{sl}}{D_{cp}}\right)^3\right). \quad (10)$$

Для определения количества пиков, которые можно расположить на частицы, используем следующее предположение. Основание пирамид расположено на веществе частиц, которое не претерпело изменение вследствие активационного воздействия. Площадь основания пирамид равно $L_{d,0}^2$. Для формирования пирамид, образующихся в результате обработке и имеющих площадь вершины $L_{d,1}^2$ необходимо какой-то объём (слой) частицы (рисунок 3). Для этого можно использовать итерационный подход, задавая на каждом шаге i изменение толщины слоя на величину Δh_{sl} . Отсюда количество пиков на i -ом шаге будет равно:

$$N_{h,i} = \frac{\pi(D_{cp} - i\Delta h_{sl})^2}{L_{d,0}^2}. \quad (11)$$

Очевидно, что толщина слоя будет изменяться на каждом шаге:

$$h_{sl}(i) = i\Delta h_{sl}. \quad (12)$$

Как и объём слоя –

$$V_{sl,i} = \frac{\pi D_{cp}^3}{6} \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2h_{sl}(i)}{D_{cp}}\right)^3\right)\right). \quad (13)$$

Из формул (9) – (12) вычисляется высота пирамиды H :

$$H = \frac{3V_{sl}}{N_{h,i} \left((L_{d,0})^2 + (L_{d,1})^2 + (L_{d,0})(L_{d,1}) \right)}, \quad (14)$$

а по формуле (8) – её апофема. Далее по формуле (7) рассчитывается площадь поверхности одного пика. Процедура расчёта завершается при выполнении условия (3).

После определения геометрических характеристик при предположении о равенстве величин плотности активированного и исходного веществ частицы рассчитывается количество активированного вещества:

$$Q_a = \frac{6V_{sl}}{\pi D_{cp}^3}. \quad (15)$$

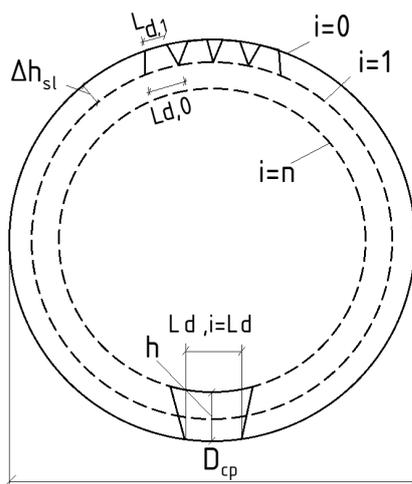


Рис. 3. Графическая иллюстрация определения количества активированного вещества (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Graphic illustration of the determination of the amount of activated substance (illustration by the authors)

3. Результаты и обсуждение

По данным, представленным в табл. 2, определено количество активированного вещества Q_a , образующегося в процессе механомагнитной активации в аппарате вихревого слоя. Результаты расчётов представлены в таблице 3.

Таблица 3

Количество образующегося активного вещества

Вид материала	$S_{\text{ТОВ}}, \text{ м}^2/\text{кг}$	$S_{\text{БЭТ}}, \text{ м}^2/\text{кг}$	$Q_a, \%$	Вид материала в зависимости от магнитной восприимчивости
Портландцемент	550	1780	8,5	Парамагнетик
	610	2075	10,3	
Строительный гипс	439	1599	5,8	Парамагнетик
	571	2132	8,4	
Известняк	215	885	3,0	Диамагнетик
	280	1180	4,1	
Кварцевый порошок	82	6780	22,8	Парамагнетик
	105	9860	33,5	

Данные, представленные в таблице 3, показывают, что наибольшее содержание активированного вещества после механомагнитной активации наблюдается у кварцевого порошка (до 33,5 %), наименьшее – у известняка (4,1 %). При этом наблюдается сильная корреляционная связь между соотношением $S_{\text{БЭТ}}/S_{\text{ТОВ}}$ и Q_a : коэффициент линейной корреляции этих двух величин равен 0,95. Отсюда можно заключить, что первичным индикатором для оценки эффективности механомагнитной обработки является соотношение $S_{\text{БЭТ}}/S_{\text{ТОВ}}$. При этом можно ожидать, что при $S_{\text{БЭТ}}/S_{\text{ТОВ}} = \text{max}$ количество активированного вещества $Q_a = \text{max}$. Кроме того, это соотношение можно использовать для классификации обрабатываемых материалов по их податливости (восприимчивости) к механомагнитной обработке. Для этого можно использовать критерий, равный:

$$k_{mm} = Q_a \frac{S_{\text{БЭТ}}}{S_{\text{ТОВ}}}. \tag{16}$$

В соответствии с этим критерием исследуемые материалы можно расположить в ряд (от минимального к максимальному):

Известняк → Строительный гипс → Портландцемент → Кварцевый порошок.

Этот результат отражает не только индивидуальные характеристики обрабатываемых материалов, но и природу. В частности, портландцемент, содержащий

C_4AF ($4CaO \times Al_2O_3 \times Fe_2O_3$) в исследуемом составе до 12 %, относится к парамагнетикам (вещества, которые намагничиваются в магнитном поле в направлении внешнего магнитного поля). Строительный гипс, содержащий $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$ и $CaSO_4$ в исходном составе в сумме до 74 % также относится к парамагнетикам, так как магнитная восприимчивость Ca составляет $44 \cdot 10^{-6}$. Кварцевый порошок также относится к парамагнетикам, хотя SiO_2 имеет ковалентную связь и относится к диамагнетикам, но присутствие оксида железа (до 10 %) придает ему свойства парамагнетиков. Известняк, содержащий в основном CaO и MgO, имеющими ионную связь, относится к диамагнетикам, при этом как отмечается в работах [15-16] медианное значение магнитной восприимчивости у известняков – $1 \cdot 10^{-5}$, у песков данное значение в 14 раз больше. Поэтому количество активированного вещества, образующихся у известняков, самое малое в исследуемых типах материалов. Отсюда можно заключить, что на этапе планирования разработки строительного материала при использовании в технологическом процессе механомагнитной обработки, как способа повышения энергоэффективности производства, целесообразно использовать минеральные вещества, являющиеся парамагнетиками, что согласуется с основными выводами по работе [17].

4. Заключение

1. Разработана методика определения количества активированного вещества, образуемого в результате механомагнитной активации в аппарате вихревого слоя.

2. В соответствии с результатами расчета по предложенной методике показано, что количество активированного вещества повышается с увеличением продолжительности механомагнитной активации: для портландцемента до 10,3 %, для гипса – до 8,4 %, для известняка – до 4,1 %, для кварцевого порошка – до 33,5 %.

3. Предложен критерий для классификации обрабатываемых материалов по их податливости к механомагнитной обработке. Установлено, что для повышения эффективности механомагнитной активации целесообразно использовать минеральные вещества, являющиеся парамагнетиками.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (Russian Science Foundation) № 24-29-00524, <https://rscf.ru/project/24-29-00524/>

Список литературы / References

1. Макаренко С.В., Хохряков О.В., Хозин В.Г., Беяков А.Ю. Цементы низкой водопотребности - эффективные строительные материалы для утилизации золошлаковых смесей ТЭЦ // Инженерный вестник Дона. 2023. № 10(106). С. 524-532.
Makarenko S.V., Khokhryakov O.V., Khozin V.G., Belyakov A.Yu. Low water demand cements - effective building materials for the utilization of ash and slag mixtures of thermal power plants // Engineering Bulletin of the Don. 2023. No. 10 (106). P. 524-532
2. Вдовин Е.А., Буланов П.Е., Выборнов Д.Р. Повышение свойств цементогрунтов в слоях дорожных одежд модификацией пластификатором // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2024. № 4(168). С. 98-103.
Vdovin E.A., Bulanov P.E., Vybornov D.R. Improving the properties of cement soils in road pavement layers by modifying them with a plasticizer // Bulletin of the Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture. 2024. No. 4(168). P. 98-103.
3. Сивальнева М.Н., Строкова В.В., Нелюбова В.В. [и др.] Методы оценки механоактивированного минерального сырья для композиционных вяжущих // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. – № 9. С. 8-22. DOI 10.34031/2071-7318-2023-8-9-8-22.
Sivalneva M.N., Strokov V.V., Nelyubova V.V. [et al.] Methods for assessing mechanically activated mineral raw materials for composite binders // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2023. - No. 9. P. 8-22. DOI 10.34031/2071-7318-2023-8-9-8-22

4. Ибрагимов Р.А., Королев Е.В., Бикаева Ю.В., Ларионов И.С. Краевые углы смачивания порошков кварца и каустического доломита после механомагнитной обработки // *Строительные материалы*. 2024. № 3. С. 64-70. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-822-3-64-70
Ibragimov R.A., Korolev E.V., Bikaeva Yu.V., Larionov I.S. Contact angles of wetting of quartz and caustic dolomite powders after mechanomagnetic treatment // *Construction materials*. 2024. No. 3. P. 64-70. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-822-3-64-70
5. Абабков Н.В. Исследование структурно-фазового состояния и внутренних напряжений в зонах локализации деформации образцов из теплоустойчивой стали // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024. № 1(47). С. 135-141. DOI 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-135-141.
Ababkov N.V. Study of structural-phase state and internal stresses in deformation localization zones of heat-resistant steel samples // *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024. No. 1(47). P. 135-141. DOI 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-135-141.
6. Жмуркин С.Ю., Аверин И.А., Пронин И.А., Карманов А.А. Методика расчета размеров областей когерентного рассеяния в материалах с сильной деформацией кристаллической решетки // *Вестник Пензенского государственного университета*. 2017. № 3(19). С. 55-60.
Zhmurkin S.Yu., Averin I.A., Pronin I.A., Karmanov A.A. Methodology for calculating the sizes of coherent scattering regions in materials with strong deformation of the crystal lattice // *Bulletin of Penza State University*. 2017. No. 3(19). P. 55-60.
7. Цыбуля С.В., Яценко Д.А. Рентгеноструктурный анализ ультрадисперсных систем: формула Дебая // *Журнал структурной химии*. 2012. Т. 53. С. 155–171.
Tsybulya S.V., Yatsenko D.A. X-ray structural analysis of ultradisperse systems: Debye formula // *Journal of Structural Chemistry*. 2012. Vol. 53. P. 155–171.
8. Семакина Н.В. Самоорганизация физико-химических и биологических систем. Ижевск : Ижевский государственный технический университет. 2018. 204 с.
Semakina N.V. Self-organization of physical-chemical and biological systems. Izhevsk: Izhevsk State Technical University. 2018. 204 p.
9. Simin Song, Wei Liu, Mingxin Wang, Jinjuan Xue, Meng Yao. Beneficial utilization of ball-milled carbon sand to activate peroxymonosulfate oxidation: Quantitation of ROS using probe-based kinetic models and mechanism insights // *Journal of Environmental Management*. Vol. 370, 2024, 122568, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.122568.
10. Xinyue Xi et al. Mechanical properties and hydration mechanism of nano-silica modified alkali-activated thermally activated recycled cement // *Journal of Building Engineering*. Vol. 98, 2024, 110998, doi: 10.1016/j.job.2024.110998.
11. Yiqie Dong et al. Triethanolamine assisted ball milling activation of high alumina fly ash: Grinding kinetics, activation mechanism // *Ceramics International*. Vol. 51, Issue 4, 2025, P. 4168-4177, doi: 10.1016/j.ceramint.2024.11.393.
12. Bao Qin, Yuefu Zhou, Zhongping Chen, Biao Wang, Zheng Zhong. A thermodynamically consistent phase field model for damage-healing of chemically active solids // *Engineering Fracture Mechanics*. Vol. 315, 2025, 110819, doi: 10.1016/j.engfracmech.2025.110819.
13. Vdovin E.A., Konovalov N.V. Activated mineral fillers for the modification of cement composites // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022. No. 7(105). P. 10511. DOI 10.4123/CUBS.105.11.
14. Vdovin E.A., Stroganov V.F., Konovalov N.V. Activation of Fillers for Cement-Mineral Systems // *Proceedings of STCCE: International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering 2022: Lecture Notes in Civil Engineering*. Vol. 291. P. 169-180. – DOI 10.1007/978-3-031-14623-7_14.
15. Муравина О.М., Жаворонкин В.И. Магнитная восприимчивость фанерозойских отложений Воронежской антеклизы // *Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле*. 2014. № 1(23). С. 79-88.

- Muravina O.M., Zhavoronkin V.I. Magnetic susceptibility of Phanerozoic deposits of the Voronezh anticline // Bulletin of the Kamchatka Regional Association Educational and Scientific Center. Series: Earth Sciences. 2014. No. 1(23). P. 79-88.
16. Головина Т.Г., Константинова А.Ф., Евдищенко Е.А. Магнитооптические эффекты в различных кристаллических материалах, пленках, мезо- и наноструктурах // Кристаллография. 2021. Т. 66. № 3. С. 341-368. DOI 10.31857/S0023476121030073.
Golovina T.G., Konstantinova A.F., Evdishchenko E.A. Magneto-optical effects in various crystalline materials, films, meso- and nanostructures // Crystallography. 2021. Vol. 66. No. 3. P. 341-368. DOI 10.31857/S0023476121030073.
17. Ибрагимов Р.А., Королев Е.В., Зарипов Ш.Х. Механизмы разрушения минеральных частиц и кинетические характеристики ферромагнитных тел в аппаратах вихревого слоя. Жилищное строительство. №1. 2025.
Ibragimov R.A., Korolev E.V., Zaripov Sh.Kh. Mechanisms of destruction of mineral particles and kinetic characteristics of ferromagnetic bodies in vortex layer devices. Housing construction. No. 1. 2025.

Информация об авторах

Ибрагимов Руслан Абдирашитович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail rusmag007@yandex.com; ORCID: 0000-0001-8879-1190

Королев Евгений Валерьевич, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

E-mail korolev@nocnt.ru; ORCID: 0000-0003-3600-812X

Information about the authors

Ruslan A. Ibragimov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail rusmag007@yandex.com; ORCID: 0000-0001-8879-1190

Evgeny V. Korolev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation

E-mail korolev@nocnt.ru; ORCID: 0000-0003-3600-812X