



Research Article

Received: December 11, 2022

Accepted: December 21, 2022

Published: December 29, 2022

ISSN 2304-6295

Activated mineral fillers for the modification of cement composites

Vdovin Yevgeny Anatolievich¹ Konovalov Nikita Vitalievich² ¹ Kazan State University of Architecture and Engineering, PhD² Kazan State University of Architecture and Engineering, assistantCorrespondence: * email vdovin@kqasu.ru; contact phone [+7 \(843\) 510-46-92](tel:+78435104692)

Keywords:

Mineral fillers; Mechanical activation; Vortex apparatus; Free surface energy; Dispersity

Abstract:

The object of the research is activated mineral fillers used for modification of cement composites. Modification with activated fillers of cement composites provides an opportunity to increase the level of strength indicators of road-building material, as well as to reduce the content of the main binder. Dolomite was used as a mineral filler. Mechanical activation of the fillers was carried out in the Vortex 297 vortex apparatus, with different exposure times. To ensure effective activation, the optimum filling factor of the grinding chamber and the size of ferromagnetic particles were determined. The character of dispersion distribution of mineral filler particles on the laser analyzer depending on the activation time was studied. The state of surfaces of a mineral filler after activation is estimated by method of acid-base interactions with definition of free surface energy which level of indicators characterizes ability of a surface to interphase interaction. Influence of activation time and mineral filler content on compressive strength of cement stone samples was established. The optimum time of activation of mineral filler in the vortex layer apparatus was determined.

1 Introduction

1.1 Минеральные наполнители

В строительном и дорожном материаловедении основной задачей исследований является повышение физико-механических свойств материалов за счет их модификации [1]. Модификацией называют взаимосвязь изменений физико-химической структуры и свойств материалов, что нашло отражение в работах современных исследователей. Основные факторы процесса модификации обусловлены:

- созданием искусственных центров кристаллизации при прямом введении в смесь примесных компонентов: «инокуляция»;
- введением поверхностно-активных веществ, замедляющих рост зёрен и способствующих образованию стабильных мелкокристаллических зародышей: «ингибция»;
- применением ряда технологических операций, в частности тепловой обработки, интенсивного перемешивания, вызывающих образование достаточного количества активных центров.

Известно, что портландцемент является основным гидравлическим вяжущим, применяемым в строительстве. При модификации свойств композиционных материалов, на основе портландцемента, актуально применение активных минеральных наполнителей [2]-[4]. Их применение позволяет получать вяжущие и материалы на их основе с заданным комплексом специальных свойств, таких как повышенная сульфатостойкость, коррозионная стойкость, кислотостойкость, водонепроницаемость, прочность в поздних сроках твердения, более низкая теплота гидратации, лучшая удобоукладываемость [5]-[7]. Применение активных минеральных наполнителей так же позволяет уменьшить содержание портландцемента в смесях и объем

Vdovin E., Konovalov N.

Activated mineral fillers for the modification of cement composites;

2022; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **105** Article No 10511. doi: 10.4123/CUBS.105.11



клинкерной части при производстве цемента, что позволяет сократить загрязнения окружающей среды техногенными выбросами.

В качестве модификаторов структуры и свойств цемента-минеральных систем известно применение таких минеральных наполнители как цеолитсодержащая порода и доломит. Доломит может участвовать в реакции гидратации цемента с образованием карбонатно-AFm фаз и оказывать влияние на увеличение прочности [8]–[10]. Природный цеолит представляет собой минеральный материал, содержащий большое количество реакционноспособных SiO_2 и Al_2O_3 как и другие пуццолановые материалы. Он способствует повышению прочности бетона за счет пуццолановой реакции с $Ca(OH)_2$. С химической точки зрения пуццолановая реакция происходит между гидроксидом кальция, также известным как портландит – $Ca(OH)_2$, и кремниевая кислота – $Si(OH)_4 \cdot Ca(OH)_2 + H_4SiO_4 \rightarrow Ca(OH)_2 + H_4 \cdot SiO_4 \rightarrow CaH_2SiO_4 \cdot 2H_2O$. Продукт CaH_2SiO_4 представляет собой гидрат силиката кальция, также сокращенно CSH. В ряде исследований [11]–[13] отмечено, что оптимальный объем замещения природного цеолита составляет около 10–20 %. В исследованиях отмечено, что бетоны с содержанием цеолита 10 % имеют повышенную прочность при сжатии и изгибе, морозостойкость, в том числе при воздействии хлоридов. Известен так же ряд методов активации минеральных наполнителей с целью повышения эффективности их модифицирующего воздействия [26]–[30].

1.2 Активация наполнителей

Различают несколько видов активации: механическая – при измельчении материалов в различных помольных устройствах; механохимическая активация – измельчение материала совместно с различными химическими добавками; термическая активация; электромагнитная активация; ультразвуковая активация; активация ионизирующим излучением; химическая – травление кислотными или щелочными растворами для создания микрорельефа частиц. Наиболее технологичным и эффективным способом увеличения активности наполнителей является механическая активация [2],[3]. По теории основоположников механохимии Юхаза, Ребиндера под воздействием механической активации происходят первичные и вторичные процессы. Первичные процессы (накопление дефектов, аморфизация, образование метастабильных полиморфных форм, увеличение внутренней и поверхностной энергии, увеличение площади поверхности, снижение энергии когерентности твердых тел) в целом увеличивают реакционную способность вещества. Вторичные процессы (агрегирование, адсорбция, рекристаллизация) происходят самопроизвольно в активных системах и могут проявляться даже во время размола или после завершения размола. Многоступенчатый характер механоактивации требует использования высокоэнергетических мельниц с различными рабочими режимами: сжатие, сдвиг, удар. Наиболее эффективно происходит механическая активация в электромагнитных мельницах, таких как аппарат вихревого слоя, который предназначен для эффективного перемешивания и измельчения различных материалов и смесей с целью интенсификации технологических процессов [15]–[17]. Выделяют несколько факторов, влияющих на процесс размола, например, атмосфера размольных сред, размер частиц и соотношение объема ферромагнитных элементов и размольного материала, степень заполнения размольной камеры, скорость и время размола [18]–[19]. В процессе размола происходит изменение состояния поверхности наполнителей, которое необходимо оценивать с точки зрения повышения активности.

1.3 Оценка состояния поверхности

Известны качественные и количественные методы оценки состояния поверхности после активации, например: определение удельной поверхности и суммарной поверхности частиц, седиментационный анализ, определение медианного размера частиц и характера распределения, потенциометрическое титрование, оценка кислотно-основных взаимодействий и др. Особенностью метода кислотно-основных взаимодействий является возможность определения свободной поверхностной энергии, уровень показателей которой характеризует способность к межфазовому взаимодействию [20]. Взаимодействия представляют особый вид, в котором одна из частиц является донором, а другая является акцептором пары электронов. В данном подходе оценки наиболее информативной характеристикой является свободная поверхностная энергия (СПЭ). Общеизвестным является факт наличия у СПЭ сложной

Vdovin E., Konovalov N.

Activated mineral fillers for the modification of cement composites;

2022; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 105 Article No 10511. doi: 10.4123/CUBS.105.11



«тонкой» структуры, аддитивно содержащей несколько компонентов различной природы [21]. По величинам этих компонентов можно судить о потенциальной способности поверхности к межфазному взаимодействию. К этим компонентам относят: дисперсионное взаимодействие (силы Ван-дер-Ваальса) γ_{LW} , кислотный параметр γ^+ , основной параметр γ^- , кислотно-основная составляющая γ_{AB} , полная СПЭ γ_s . Поверхность раздела фаз обладает избытком некомпенсированной энергии. Этот избыток в расчете на единицу поверхности составляет удельную свободную поверхностную энергию [22]. Она не является особой формой энергии, а обусловлена положением молекул на границе раздела фаз. Энергетический аспект свободной поверхностной энергии определяется работой изотермического и обратимого изменения площади поверхностного слоя в расчете на 1 м^2 . Свободную поверхностную энергию рассматривают как работу переноса молекул из объема тела на поверхность [24]. Чем сильнее межмолекулярные связи в данном теле, тем больше уровень СПЭ на границе с газовой фазой. Свободная поверхностная энергия объектов - один из наиболее фундаментальных по своему значению и содержанию параметр, представляющий собой функции отклика критериев и условий образования адгезионных соединений и служащий физико-химическим эквивалентом характеристикам сопротивления адгезионных соединений внешним воздействиям [25]. Анализ литературных данных свидетельствует о том, что недостаточно исследованы методы оценки и влияние активации минеральных наполнителей в электромагнитном поле на структуру и свойства цемента-минеральных материалов строительного назначения.

1.4 Цели и задачи исследования

Целью данной работы является исследование влияния параметров активации минеральных наполнителей в аппарате вихревого слоя на характер изменения дисперсности, свободной поверхностной энергии, а также прочности при сжатии образцов модифицированных цемента-минеральных материалов.

Для достижения цели исследования решались следующие задачи:

- определение оптимальных размеров ферромагнитных частиц при активации минеральных наполнителей в аппарате вихревого слоя;
- исследование изменение характера дисперсности наполнителей на основе доломита, в зависимости от времени активации в аппарате вихревого слоя;
- определение свободной поверхностной энергии и ее составляющих у активированных минеральных наполнителей;
- исследование влияния времени активации и содержания активированных наполнителей на уровень прочности при сжатии модифицированных цемента-минеральных камней.

2 Materials and Methods

Активация минеральных наполнителей проводилась в течение 2, 4, 6 минут в аппарате вихревого слоя (ABC Vortex 297, Нижний Новгород, Россия) под воздействием ферромагнитных частиц,двигающихся в магнитном поле реактора (рис. 1). Длина рабочей зоны индуктора 330 мм, напряжение на индукторе вихревого слоя регулируется в диапазоне 30 В – 380 В, сила тока 20 А – 180 А, частота индуктора до 400 Гц. Подбор ферромагнитных частиц (табл. 1) для активации наполнителей в ABC осуществлялся путем определения оптимального соотношения длины (l) к диаметру (d).

Таблица 1. Технические характеристики ферромагнитных частиц
Table 1: Technical characteristics of ferromagnetic particles

l , длина частицы, мм	d , диаметр частицы, мм
21.8	3.0
19.8	2.0
15.8	1.5

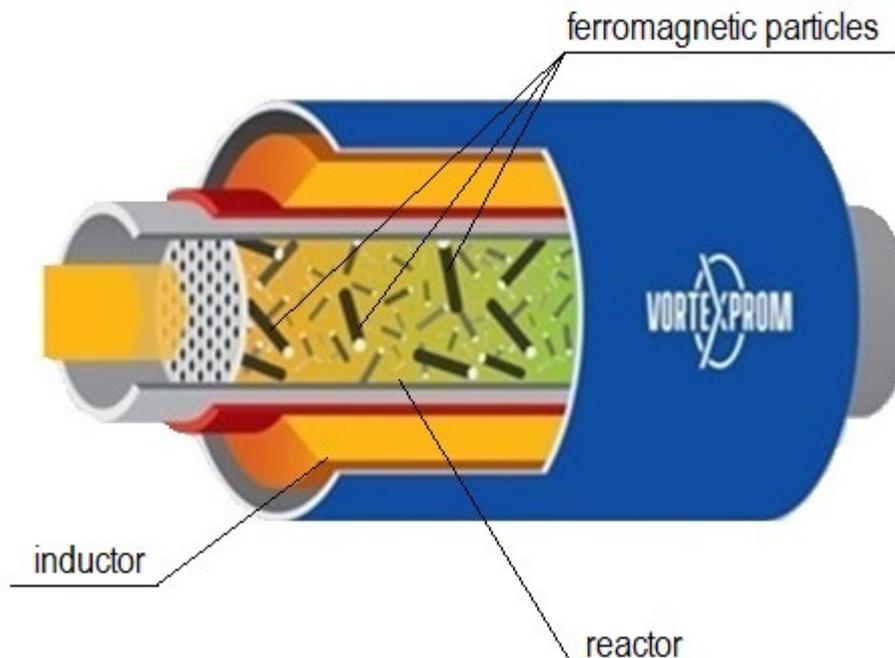


Рис. 1 - Реактор аппарата вихревого слоя ABC Vortex 297
Fig. 1 - Vortex 297 ABC vortex reactor

Определение степени дисперсности проводилось на лазерном анализаторе размера частиц (HORIBA LA-950, Киото, Япония) после фиксированного времени активации наполнителя. Диапазон измерений размера частиц от 0.1 – 1000 мкм. Источники оптического излучения: лазерный диод с длиной волны 650 нм и светодиод с длиной волны 405 нм.

Составляющие и параметры свободной поверхностной энергии активированных наполнителей определялись по краевому углу смачивания. Определение выполнялось методом избирательного смачивания в присутствии тестовых (дистиллированная вода, глицерин, формамид) и нейтральной (н-гексан) жидкостей. При погружении твердого тела в жидкость, требуется некоторое конечное время, чтобы форма мениска приобрела равновесное положение. Равновесие определяется одновременным взаимодействием трех поверхностных натяжений: γ_s - поверхностная энергия наполнителя; γ_{sl} - межфазная энергия, γ_l - поверхностное натяжение жидкости на границе с газовой средой. (рис. 2). Поверхностная энергия γ_l действует под определенным углом θ , который называется краевым углом смачивания.

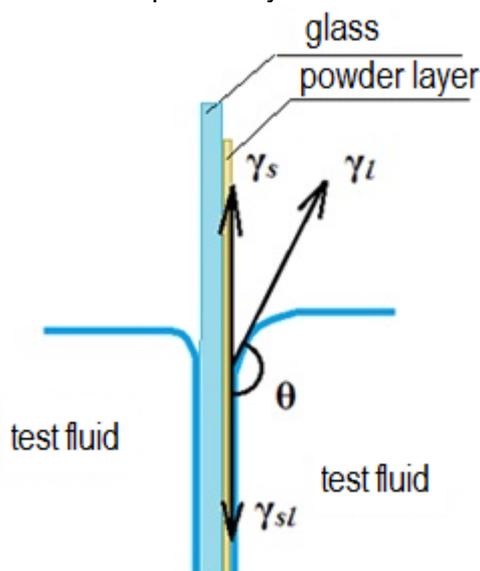


Рис. 2 - Схематичное изображение определения краевого угла смачивания
Fig. 2 - Schematic representation of determining the wetting angle



В качестве минеральных наполнителей применялся доломит месторождения «Жигулевский», с содержанием $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$ – 96.1 % и влажностью 0.4 %, средний медианный размер частиц равен 19.0 мкм (рис.3).

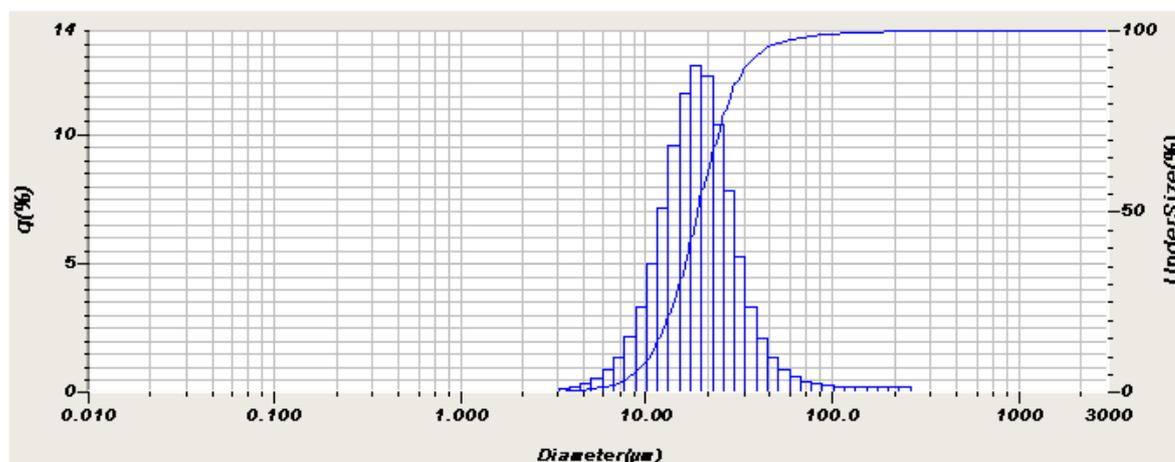


Рис. 3 - Распределение частиц порошка доломита
Fig. 3 - Distribution of dolomite powder particles

Для изготовления образцов цемента-минерального камня в качестве вяжущего использовался нормальнотвердеющий бездобавочный портландцемент (ЦЕМ I 42.5Н, Катавский цемент, Челябинск) (таб. 2- 3).

Таблица 2. Химический состав цемента
Table 2. Chemical composition of cement

Химический состав, %						
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O
65.31	21.56	4.39	3.85	1.2	2.86	0.44

Таблица 3. Минералогический состав цемента
Table 3: Mineralogical composition of cement

Содержание основных минералов			
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
64.1	14.9	5.3	11.9

Определение прочности цементного камня определялось на образцах кубах, с размером граней 40 x 40 мм, в возрасте 28 суток.

Оценка влияния времени активации и состава наполнителя на прочность при сжатии образцов цементного камня проводилась методом оптимизации трехфакторного ротационного планирования эксперимента. Независимыми переменными являлись следующие факторы: содержание активированного наполнителя и время активации. Содержание активированного наполнителя изменялось в пределах от 10 до 40 % взамен части портландцемента.

3 Results and Discussion

Согласно исследованиям [3], оптимальные соотношения значений размеров ферромагнитных частиц (l/d) лежит в пределах 10÷13, а коэффициент загрузки размольной камеры в пределах 0.5÷0.7. При выполнении этих условий, реализуется максимальное количество ударов, величина импульса и частоты воздействия. Так же по данным исследований, при воздействии на минеральные материалы, оптимальный диаметр частиц лежит в диапазоне 1.4÷1.9 мм. В результате применения данного подхода определен оптимальный размер



ферромагнитных частиц: 15.8 x 1.5 мм, при соотношении длины (l) к диаметру (d) – 10.53 (таб. 4). Коэффициент наполнения размольной камеры при активации принят 0.6.

Таблица 4. Технические характеристики ферромагнитных частиц
Table 4: Technical characteristics of ferromagnetic particles

l, длина частицы, мм	d, диаметр частицы, мм	l/d
21.8	3.0	7.27
19.8	2.0	9.9
15.8	1.5	10.53

Проведена оценка изменения дисперсности наполнителя после активации в течение 2, 4, 6 минут. При активации доломита в АВС до 6 минут медианный размер частиц понизился с 19.0 мкм до 10.8 мкм (рис. 5, 6, 7). Активация доломита более 4 минут снижает скорость повышения дисперсности на 12 % в результате коагуляции частиц наполнителя, что понижает эффективность обработки.

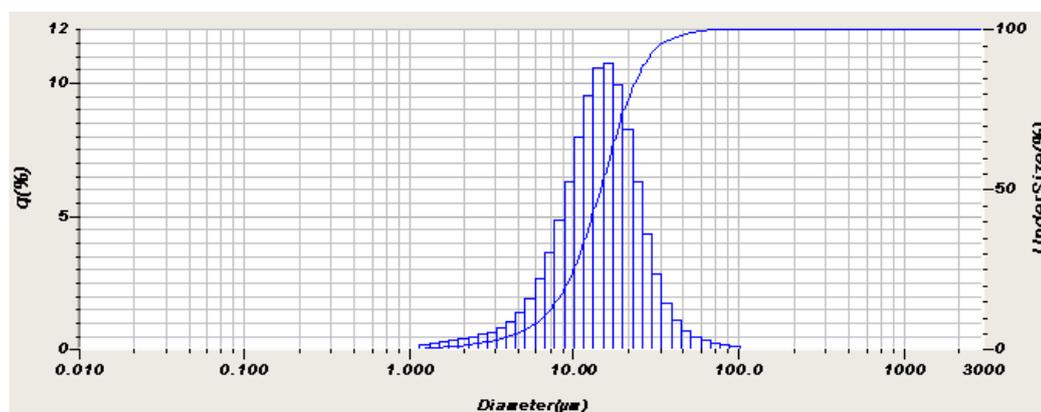


Рис. 5. - Распределение частиц порошка доломита при активации 2 минуты
Fig. 5. - Distribution of dolomite powder particles during activation for 2 minutes

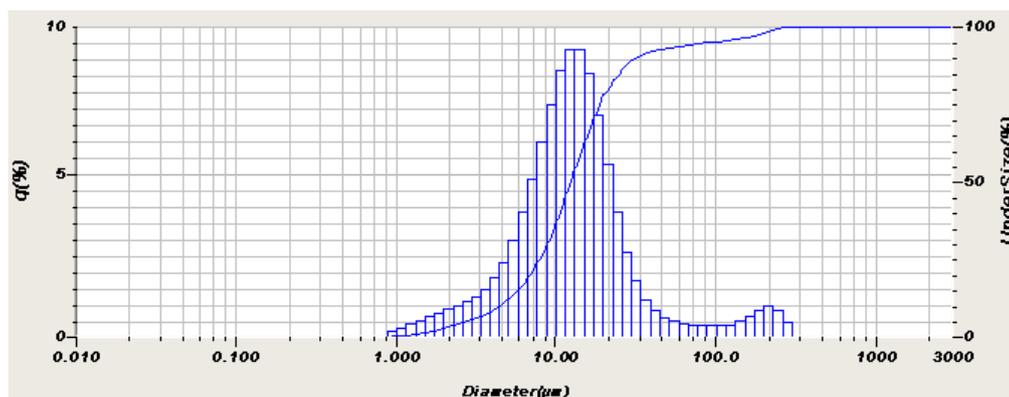


Рис. 6. - Распределение частиц порошка доломита при активации 4 минуты
Fig. 6. - Distribution of dolomite powder particles during activation for 4 minutes

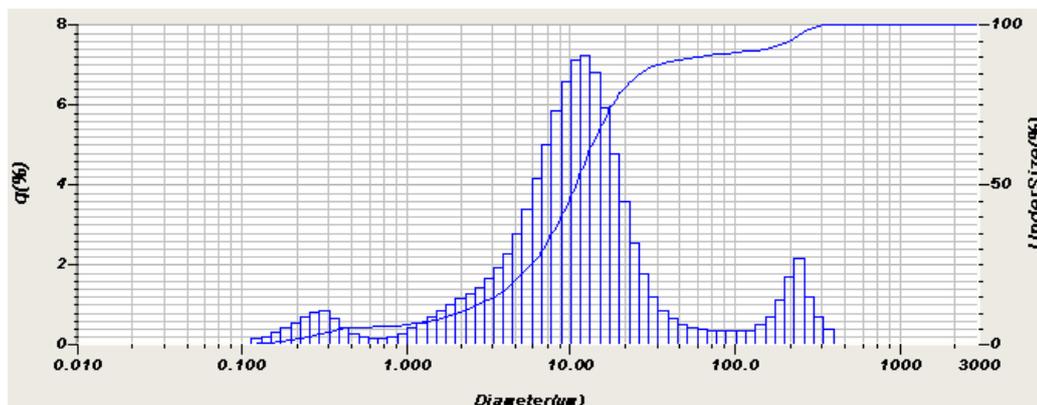


Рис. 7. - Распределение частиц порошка доломита при активации 6 минут
Fig. 7. - Distribution of dolomite powder particles during activation for 6 minutes

Определены характеристики свободной поверхностной энергии минерального наполнителя после активации в течение оптимального промежутка времени (таб. 5, рис. 8). Доломит характеризуется невысокой полярностью (γ^{AB}) 1.5 мДж/м², а его полная СПЭ определяется главным образом дисперсионными составляющими (γ_s и γ^{LW}) 50.9 и 52.6 мДж/м², соответственно. Поверхность доломитового наполнителя в целом нейтральна, но, как отмечено в исследованиях [12] активность межфазовых взаимодействий зависит от γ^{AB} полярности материала.

Таблица 5. Параметры СПЭ активированных наполнителей
Table 5. Parameters of POC activated fillers

активированные наполнители	параметры СПЭ активированных наполнителей, мДж/м ²				
	γ^{LW}	γ^+	γ^-	γ^{AB}	γ_s
доломит	52.6	0.05	0.7	1.5	50.9

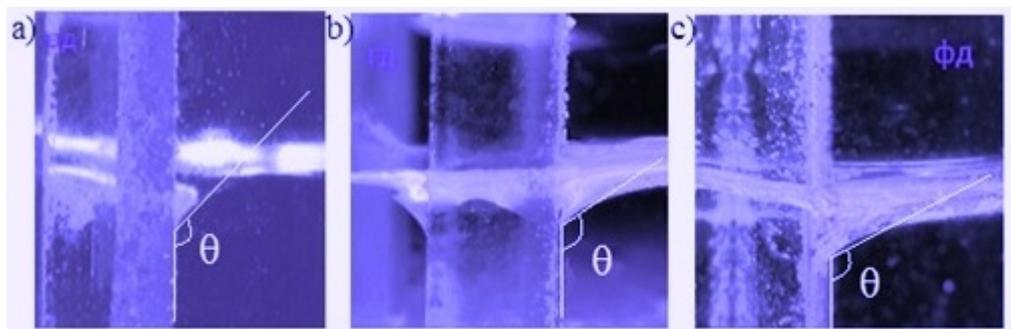


Рис. 8. - Оценка поверхностных свойств порошка доломита в тестовых жидкостях: а) – вода; б) – глицерин; в) – формамид
Fig. 8. - Evaluation of surface properties of dolomite powder in test liquids: a) - water; b) - glycerol; c) - formamide

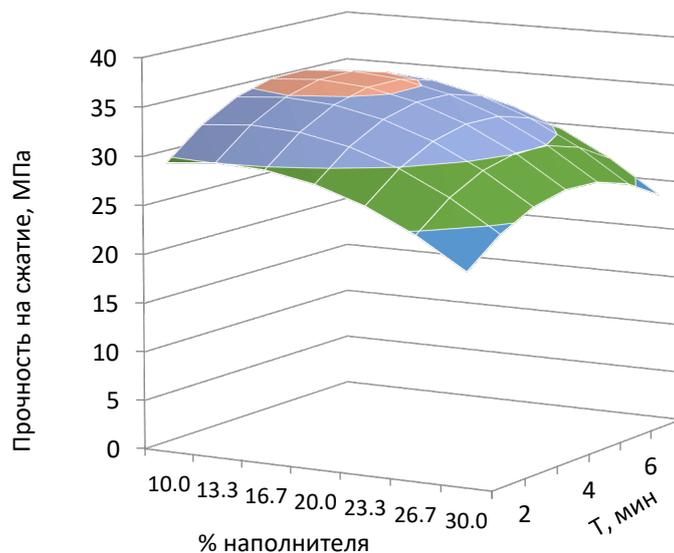


Рис. 9. - График зависимости прочности при сжатии цементного камня от времени активации (Т) и содержания активированного наполнителя

Fig. 9. - Diagram of compressive strength of cement stone as a function of activation time (T) and activated filler content

На основе анализа зависимостей прочностных показателей (рис. 9) определено оптимальное содержание активированного наполнителя, которое составило 14.6 % от массы портландцемента. Время активации в АВС, при котором достигается максимальное значение прочности при сжатии образцов цементного камня, – 4 минуты (рис. 10), что согласуется с результатами изучения дисперсности активированных наполнителей.

4 Conclusions

1. Установлен оптимальный размер ферромагнитных частиц исходя из максимальной энергии воздействия и частоты в аппарате вихревого слоя, который составил 15.8 x 1.5 мм для исследуемых минеральных наполнителей и помольных ферромагнитных элементов.
2. Выявлена возможность снижения медианного размера частиц доломита на 34 % при оптимальном времени активации в течение 4 минут.
3. Установлены характеристики поверхности активированного наполнителя и определены параметры свободной поверхностной энергии. Кислотно-основная составляющая свободной поверхностной энергии активированного доломита – 1.5 мДж/м² и косвенно влияет на повышение активности в межфазовых взаимодействиях.
4. Определены оптимальные параметры активации в аппарате вихревого слоя минеральных наполнителей для модификации цемента-минеральных систем, показатели которых имеют следующие значения: содержание наполнителя 14.6 % от массы портландцемента.

References

- 1 Liu, Y., Wang, J., Hu, S., Cao, S. and Wang, F. (2022) Enhancing the Mechanical Behaviour of Concretes through Polymer Modification of the Aggregate-Cement Paste Interface. *Journal of Building Engineering*, 104605. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104605>.
- 2 Wang, Y., Shui, Z., Wang, L., Gao, X., Huang, Y., Song, Q. and Liu, K. (2020) Alumina-Rich Pozzolan Modification on Portland-Limestone Cement Concrete: Hydration Kinetics, Formation of Hydrates and Long-Term Performance Evolution. *Construction and Building Materials*, **258**, 119712. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119712>.
- 3 Sharma, R., Jang, J.G. and Bansal, P.P. (2022) A Comprehensive Review on Effects of Mineral Admixtures and Fibers on Engineering Properties of Ultra-High-Performance Concrete. *Journal*

Vdovin E., Konovalov N.

Activated mineral fillers for the modification of cement composites;

2022; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **105** Article No 10511. doi: 10.4123/CUBS.105.11



- of *Building Engineering*, **45**, 103314. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103314>.
- 4 Deng, S., Ren, P., Jiang, Y., Shao, X. and Ling, T.-C. (2022) Use of CO₂-Active BOFS Binder in the Production of Artificial Aggregates with Waste Concrete Powder. *Resources, Conservation and Recycling*, **182**, 106332. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106332>.
- 5 Gupta, M., Raj, D.R. and Kumar Sahu, D.A. (2022) Effect of Rice Husk Ash, Silica Fume & GGBFS on Compressive Strength of Performance Based Concrete. *Materials Today: Proceedings*, **55**, 234–239. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.343>.
- 6 Nie, Y., Shi, J., He, Z., Zhang, B., Peng, Y. and Lu, J. (2022) Evaluation of High-Volume Fly Ash (HVFA) Concrete Modified by Metakaolin: Technical, Economic and Environmental Analysis. *Powder Technology*, **397**, 117121. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117121>.
- 7 Alqarni, A.S. (2022) A Comprehensive Review on Properties of Sustainable Concrete Using Volcanic Pumice Powder Ash as a Supplementary Cementitious Material. *Construction and Building Materials*, **323**, 126533. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126533>.
- 8 Xu, J., Lu, D., Zhang, S., Xu, Z. and Hooton, R. (2021) Reaction Mechanism of Dolomite Powder in Portland-Dolomite Cement. *Construction and Building Materials*, **270**, 121375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121375>.
- 9 Tian, W., Liu, Y., Wang, M. and Wang, W. (2021) Performance and Economic Analyses of Low-Energy Ohmic Heating Cured Sustainable Reactive Powder Concrete with Dolomite Powder as Fine Aggregates. *Journal of Cleaner Production*, **329**, 129692. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129692>.
- 10 Xu, J., Chen, J., Lu, D., Xu, Z. and Hooton, R.D. (2019) Effect of Dolomite Powder on the Hydration and Properties of Calcium Sulfoaluminate Cements with Different Gypsum Contents. *Construction and Building Materials*, **225**, 302–310. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.050>.
- 11 Kazemian, M. and Shafei, B. (2022) Internal Curing Capabilities of Natural Zeolite to Improve the Hydration of Ultra-High Performance Concrete. *Construction and Building Materials*, **340**, 127452. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127452>.
- 12 Rahul, P., Prasad Ravella, D. and Chandra Sekhara Rao, P.V. (2022) Durability Assessment of Self-Curing High Performance Concretes Containing Zeolite Admixture. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.352>.
- 13 Zolghadri, A., Ahmadi, B. and Taherkhani, H. (2022) Influence of Natural Zeolite on Fresh Properties, Compressive Strength, Flexural Strength, Abrasion Resistance, Cantabro-Loss and Microstructure of Self-Consolidating Concrete. *Construction and Building Materials*, **334**, 127440. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127440>.
- 14 Ibragimov, R. and Fediuk, R. (2019) Improving the Early Strength of Concrete: Effect of Mechanochemical Activation of the Cementitious Suspension and Using of Various Superplasticizers. *Construction and Building Materials*, **226**, 839–848. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.313>.
- 15 Stroganov, V., Sagadeev, E., Ibragimov, R. and Potapova, L. (2020) Mechanical Activation Effect on the Biostability of Modified Cement Compositions. *Construction and Building Materials*, **246**, 118506. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118506>.
- 16 Vdovin, E., Stroganov, V. and Konovalov, N. (2021) Modification of Road Soil Cement with Activated Fillers. *Lecture Notes in Civil Engineering*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72404-7_33.
- 17 Khaydarov, B., Suvorov, D., Pazniak, A., Kolesnikov, E., Gorchakov, V., Mamulat, S. and Kuznetsov, D. (2018) Efficient Method of Producing Clinker-Free Binding Materials Using Electromagnetic Vortex Milling. *Materials Letters*, **226**, 13–18. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.05.016>.
- 18 Zhang, D.J., Tian, X.F., Hou, H.B., Liu, H. and Tan, S.K. (2007) Mechanical Behavior and Mechanism of Stabilizing Soft Soil by Slag Cementitious Material. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, **28**. https://www.mendeley.com/catalogue/a200eb00-b973-326f-bf49-693263d11e0a/?utm_source=desktop&utm_medium=1.19.8&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId=%7Bbeef21da3-68fa-3d3a-976a-3f2eafa4dc53%7D
- 19 E.A. Vdovin, V.F. Stroganov, N.V. Konovalov, L.F. Mavliev: Analysis of the possibilities of modification and the choice of rational methods and technologies for strengthening the soil by activated fillers for road construction // *News KSUAE* 2018 № 4 (46) , p. 274-282. ISSN: 2073-



1523, eISSN: 2073-154X.

https://izvestija.kgasu.ru/en/nomera-zhernala/new-issues?sod=sod4_2018&idizv=40

- 20 Lobel, B.T., Robertson, H., Webber, G.B., Ireland, P.M. and Wanless, E.J. (2022) Impact of Surface Free Energy on Electrostatic Extraction of Particles from a Bed. *Journal of Colloid and Interface Science*, **611**, 617–628. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.12.117>.
- 21 Huang, T., Luo, J., Luo, R. and Tu, C. (2022) Investigation on the Relationship between the Surface Texture Index and the Surface Free Energy of Aggregate. *Construction and Building Materials*, **325**, 126759. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126759>.
- 22 Çitak, A. and Yarbaş, T. (2022) Using Contact Angle Measurement Technique for Determination of the Surface Free Energy of B-SBA-15-x Materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **112**, 103024. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.103024>.
- 23 Kuznetsov, G.V., Islamova, A.G., Orlova, E.G., Ivashutenko, A.S., Shanenkov, I.I., Zykov, I.Y. and Feoktistov, D.V. (2021) Influence of Roughness on Polar and Dispersed Components of Surface Free Energy and Wettability Properties of Copper and Steel Surfaces. *Surface and Coatings Technology*, **422**, 127518. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127518>.
- 24 Starostina, I.A., Kolpakova, M. V. and Stoyanov, O. V. (2021) An Estimation of Adhesive Interaction of Polymer Coatings with Metals Using the van Oss–Chaudhury–Good Equation. *Polymer Science, Series D*, **14**, 8–12. <https://doi.org/10.1134/S1995421221010238>.
- 25 Ibragimov R. A., Potapova L. I., Korolev E. V. Investigation of structure formation of activated nanomodified cement stone by IR spectroscopy. News KSUAE. 2021. № 3 (57). P. 41–49. https://doi.org/10.52409/20731523_2021_3_41
- 26 Fang, K., Zhao, J., Wang, D., Wang, H. and Dong, Z. (2022) Use of Ladle Furnace Slag as Supplementary Cementitious Material before and after Modification by Rapid Air Cooling: A Comparative Study of Influence on the Properties of Blended Cement Paste. *Construction and Building Materials*, **314**, 125434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125434>.
- 27 Moreno de los Reyes, A.M., Suárez-Navarro, J.A., Alonso, M.D.M., Gascó, C., Sobrados, I. and Puertas, F. (2022) Hybrid Cements: Mechanical Properties, Microstructure and Radiological Behavior. *Molecules*, **27**. <https://doi.org/10.3390/molecules27020498>.
- 28 Wang, Z., Chu, H., Wang, J., Feng, E., Zhang, Y. and Lyu, X. (2022) Mechanical Activation of Siliceous Tailings and Its Application as Cement Admixtures. *Minerals Engineering*, **177**. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107366>.
- 29 Robayo-Salazar, R., Valencia-Saavedra, W. and Mejía de Gutiérrez, R. (2022) Recycling of Concrete, Ceramic, and Masonry Waste via Alkaline Activation: Obtaining and Characterization of Hybrid Cements. *Journal of Building Engineering*, **46**. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103698>.
- 30 Korkmaz, A.V. (2022) Mechanical Activation of Diabase and Its Effect on the Properties and Microstructure of Portland Cement. *Case Studies in Construction Materials*, **16**. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00868>.