

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-7-33-43

<sup>1,\*</sup>Загороднюк Л.Х., <sup>1</sup>Махортов Д.С., <sup>1</sup>Рыжих В.Д., <sup>1</sup>Сумской Д.А., <sup>2</sup>Дайронас М.В.<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова<sup>2</sup>Северо-кавказский филиал Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова

\*E-mail: LHZ47@mail.ru

## РОЛЬ ГРАНУЛОМЕТРИИ СМЕШАННЫХ ВЯЖУЩИХ В ФОРМИРОВАНИИ ИХ МИКРОСТРУКТУРЫ И ПРОЧНОСТИ

**Аннотация.** При измельчении портландцемента и различных минеральных наполнителей образуется сложная система, состоящая из зерен различного размера с преобладанием высокодисперсной фазы. В работе проведены исследования влияния смешанных вяжущих, приготовленных на основе портландцемента и вулканического пепла при различных дозировках. Проведен анализ частиц вулканического пепла и установлено, что наличие мельчайших фракций в диапазоне от 0,3 до 0,07 мкм прогнозирует активное взаимодействие в системе и заполнение порового пространства продуктами гидратации. Установлено, что смешанные вяжущие, полученные механическим смешением (без помола) с содержанием 10 % вулканического пепла имеют прочность на 13 % выше бездобавочного цемента. Смешанные вяжущие, активированные помолом в вибрационной мельнице с содержанием вулканического пепла в количестве 10 % характеризуются повышением прочности при сжатии на 22 %, что позволяет экономить портландцемент до 10 %. Смешанные вяжущие с содержанием вулканического пепла в количестве 20 % соответствуют прочности бездобавочного цемента. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности и целесообразности использования вулканического пепла в качестве минерального компонента смешанных вяжущих. Микроструктура образца цементного камня из активированного смешанного вяжущего обладает высокой однородностью, в сколе образца отчетливо видны плотные сросшимися пластины вторичной гидросиликатной структуры, на поверхностях вторичных гидросиликатных структур формируются кристаллические продукты пуццолановых реакций между частицами пепла и продуктами гидратации цемента. Целью данной статьи явилось изучение роли гранулометрии смешанных вяжущих в формировании их микроструктуры и прочности.

**Ключевые слова:** смешанные вяжущие, вулканический пепел, гранулометрический состав, микроструктура, прочность цементного камня.

**Введение.** В строительной отрасли в последние годы появляются новые разновидности вяжущих, рекомендуемые для использования при изготовлении различных изделий и конструкций. Новые вяжущие обеспечивают строительным композитам специальные свойства, увеличивая их прочность и долговечность [1–14]. К таким вяжущим относятся смешанные вяжущие, получаемые на основе портландцементов и различных минеральных добавок. В качестве минеральных добавок используют добавки природного происхождения, а также вторичное сырье промышленного производства (шламы, шлаки, золы и др.) [15–20]. Особый интерес среди активных добавок представляют минеральные добавки вулканического происхождения, в частности, вулканический пепел, состоящий в основном из кремнезема и глинозема (70...90 %). По рентгенофазовому анализу он представляет собой смесь аморфизированного стекла (50...80 %) и некоторых силикатов и алюминатов, гидратов в кристаллическом состоянии. Активация цементных частиц в процессе измельчения с минеральным наполнителем является сложным многоступенчатым процессом изменения энергетического состояния

смеси в условиях помола [21–23]. Известно, что приготовление смешанных вяжущих в различных помольных установках позволяет получать вяжущие с различными физико-механическими и технологическими свойствами [24]. Это обусловлено образованием новых поверхностей с сопровождением процессов активации компонентов смеси, изменением структуры кристаллической решетки вещества, различной аморфизацией поверхностных слоев частиц, различными видами излучения, которыми сопровождается измельчение, изменение вида химических связей на поверхности и в глубинах вещества и других процессах [25]. Гранулометрический состав компонентов вяжущей смеси оказывает существенное влияние на механическую прочность затвердевшего цементного камня. Гранулометрия вяжущих, размолотых в различных мельницах характеризуется отличительными составами, оказывающими существенное влияние на реологические характеристики растворов и бетонов. Наиболее высокие физико-механические показатели имеют цементы, измельченные в вибромельницах [26–29], с увеличением времени активации активность вяжущих увеличивается.

**Методология.** Для проведения анализа распределения частиц материалов: портландцемента, вулканического пепла и полученных смешанных вяжущих применялся лазерный анализатор Analysette 22 Nano Tec plus. Исследование микроструктуры образцов проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU. Физико-механические свойства смешанных вяжущих определяли в соответствии с нормативными требованиями. На приборе ARL9900 методом рентгеновской флуоресценции определяли элементный состав проб, и методом рентгеновской дифракции – фазовый состав проб.

**Основная часть.** При получении смешанных вяжущих использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (ГОСТ 31108) ЗАО «Белгородский цемент» (таблица 1, таблица 2) и вулканический пепел Кенженского месторождения Кабардино-Балкарской Республики, химический состав приведен в таблице 3. Вулканический пепел имеет истинную плотность 2340 кг/м<sup>3</sup>, среднюю плотность 1650 кг/м<sup>3</sup>, пористость 30 %, водопоглощение по массе 16 %, коэффициент размягчения 0,72.

Минералогический состав (%) средней пробы вулканического пепла приведен на рис. 1.

Таблица 1

**Химический состав портландцемента**

Марка цемента	Химический состав, масс. %						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O
ЦЕМ I 42,5Н ГОСТ 31108-2016	22,0±0,3	5,4±0,1	4,2±0,1	66,2±0,4	0,6±0,2	0,14±0,1	0,55±0,1

Таблица 2

**Строительно-технические характеристики цемента**

Наименование показателя	ЦЕМ I 42,5Н ГОСТ 31108-2016
Минералогический состав клинкера, масс. %	
C <sub>3</sub> S	59,0±2,0
C <sub>2</sub> S	18,8±2,0
C <sub>3</sub> A	7,0±0,2
C <sub>4</sub> AF	13,1±0,3
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	330±4
Нормальная густота цементного теста, %	25,5±0,3
Сроки схватывания, мин	
начало	130-170
конец	200-230
Средняя активность при пропаривании, МПа	39,5±1,1
Активность в двухсуточном возрасте, МПа	26

Таблица 3

**Химический состав вулканического пепла**

Химический состав, масс. %								
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (общ.)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub> (общ.)
59,6±0,3	15,0±0,2	3,6±0,1	0,2±0,1	6,3±0,1	3,3±0,1	1,6±0,1	4,4±0,2	0,1±0,1

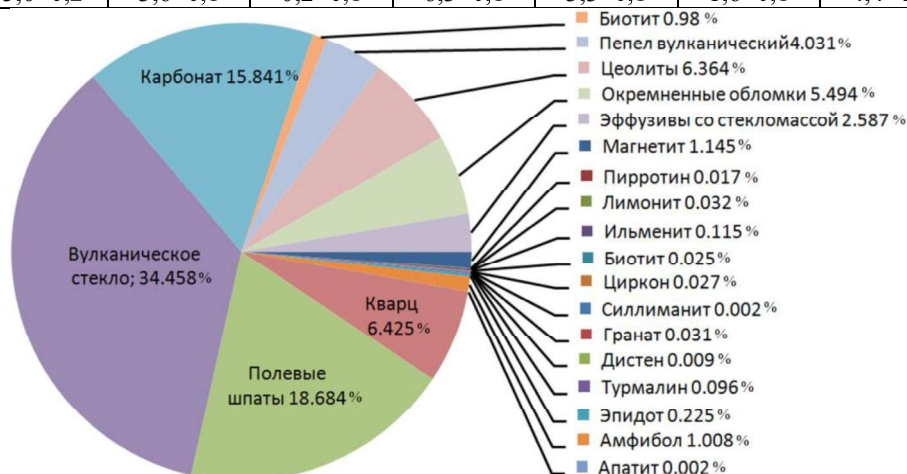


Рис. 1. Минералогический состав (%) вулканического пепла

Особенности морфологии и формы поверхности природного вулканического пепла обусловлены спецификой процессов его образования. Вулканический пепел характеризуется полидисперсным распределением частиц с изменением в диапазоне от 1 до 350 мкм. Зерна вул-

канического пепла, имея различную форму, характеризуются высокой развитой шероховатой поверхностью. Указанные свойства обеспечивают высокую размолоспособность вулканического пепла, а также дают определенные предпосылки для использования его в качестве активного минерального наполнителя в цементных системах.

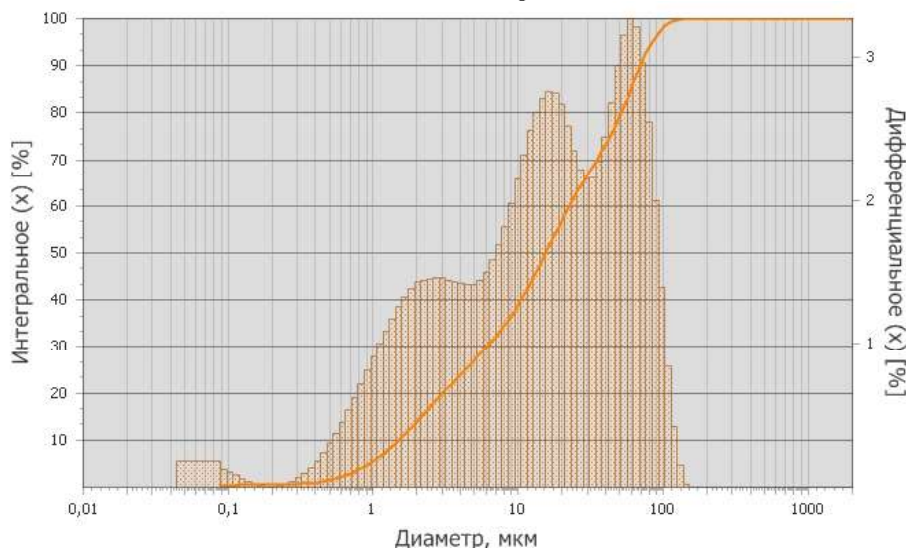


Рис. 2. Распределение частиц вулканического пепла по размерам

Анализ кривой распределения частиц вулканического пепла по размерам показывает, что в измельчаемой системе происходят сложные процессы, затормаживающие измельчение материала и влияющие на количественное изменение фракций в указанных диапазонах (рис. 2). Наличие мельчайших фракций в диапазоне от 0,3 до 0,07 мкм прогнозирует активное взаимодействие в системе и заполнение порового пространства продуктами гидратации.

Смешанные вяжущие с заданными свойствами получали в вибрационной мельнице ВМ-5. Использование этой мельницы позволило получить смешанные вяжущие с заданными свойствами.

Гранулометрический состав портландцемента и смешанных вяжущих, полученных при помоле в вибрационной мельнице при последующем механическом смешении приведен на рисунке 3.

Сравнение кривых гранулометрических составов портландцемента и полученных смешанных вяжущих показало, что кривая гранулометрии цемента размещается в обычном диапазоне размеров зерен от 1 мкм до 100 мкм, отмечается наибольшее содержание зерен фракции 30–60 мкм. Кривая гранулометрии портландцемента, активированного в вибрационной мельнице, значительно сдвигается влево, в область мелких фракций, что отчетливо видно на рисунке 3. Гранулометрический состав смешанных вяжущих

характеризуется значительным содержанием мелких зерен в диапазоне от 1 мкм до 100 мкм, площадь левой ветви кривой гранулометрии значительно возрастает, что указывает на присутствие большого количества зерен фракции 1–10 мкм. Следует отметить, что правая ветвь в диапазоне от 10 до 100 мкм значительно снижается.

Сравнительное исследование поведения исходных цементов и полученных смешанных вяжущих осуществлялось следующим образом. Готовили смеси составов 1-6 (без помола) и 1п-6п (с помолом, таблица 6) с добавлением вулканического пепла в количестве: 10, 20, 30, 40 и 50 %. Смеси 1-6 готовили без помола, при одинаковых условиях механического смешения, при этом средняя удельная поверхность смесей составляла 374 м<sup>2</sup>/кг. Составы 1п-6п загружали в вибрационную мельницу и подвергали помолу в течение 20 мин. В результате совместного помола и последующего смешения в вибрационной мельнице удельная поверхность смеси составляла в среднем 693 м<sup>2</sup>/кг. Разница в удельных поверхностях составов 1-6 и 1п-6п составляет двукратное увеличение, что не может отразиться на формировании структуры и повышении прочности цементного камня. Динамика изменения прочности смешанных вяжущих в зависимости от разной удельной поверхности отражена на рис. 4. Изменение нормальной плотности смешанных вяжущих разного состава в зависимости от различной удельной поверхности приведены на рис. 5.

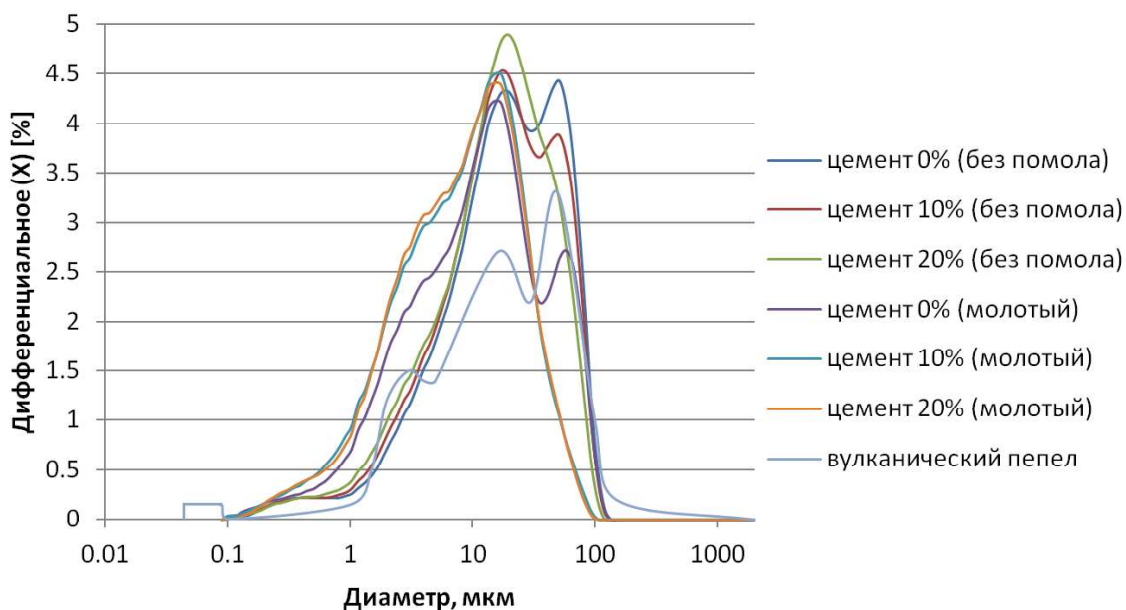
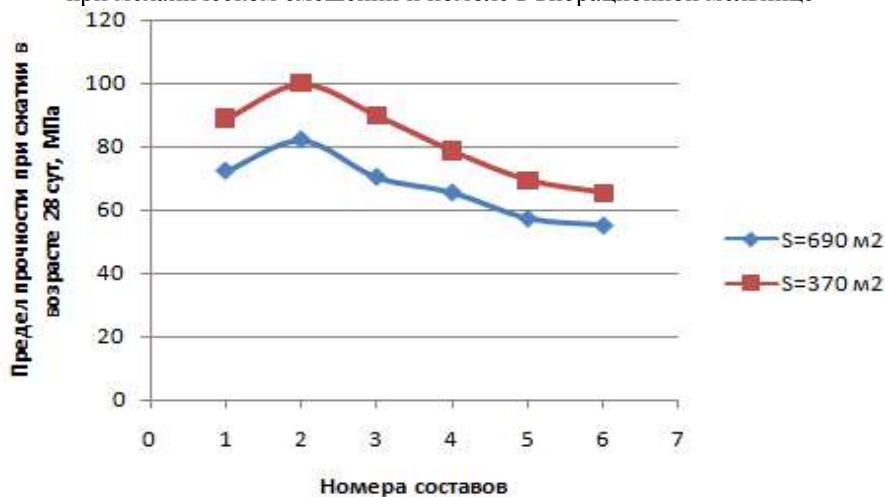
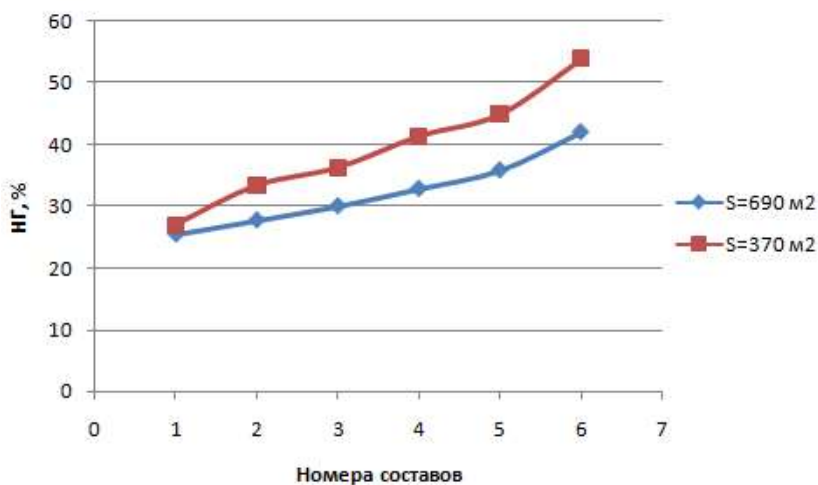


Рис. 3. Гранулометрический состав портландцемента и смешанных вяжущих, полученных при механическом смешении и помоле в вибрационной мельнице



Составы смешанных вяжущих: цемент–вулканический пепел, %  
 1) 100; 2) 90:10; 3) 80:20; 4) 70:30; 5) 60:40; 6) 50:50

Рис. 4. Динамика изменения прочности смешанных вяжущих разного состава в зависимости от различной удельной поверхности



Составы смешанных вяжущих: цемент–вулканический пепел, %  
 1) 100; 2) 90:10; 3) 80:20; 4) 70:30; 5) 60:40; 6) 50:50

Рис. 5. Изменение нормальной плотности смешанных вяжущих разного состава в зависимости от различной удельной поверхности

Установлено, что смешанные вяжущие, полученные механическим смешением (без помола) с содержанием 10 % вулканического пепла имеют прочность на 13 % выше бездобавочного цемента. Смешанные вяжущие, активированные помолем в вибрационной мельнице с содержанием вулканического пепла в количестве 10 % характеризуются повышением прочности при сжатии на 22 %, одновременно с этим эконо-

мится портландцемент до 10 %. Смешанные вяжущие с содержанием вулканического пепла в количестве 20 % соответствуют прочности бездобавочного цемента, позволяя экономить дорогостоящий портландцемент до 20 %.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности и целесообразности использования вулканического пепла в качестве минерального компонента смешанных вяжущих.

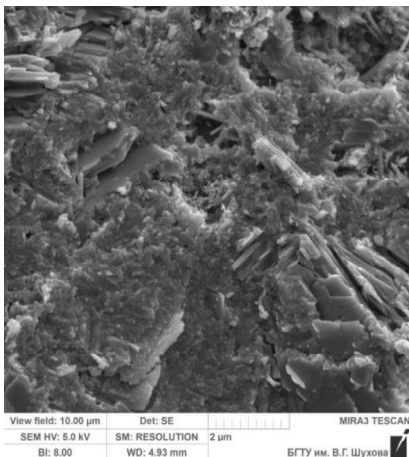


Рис. 6. Микроструктура портландцемента в возрасте 28 сут твердения

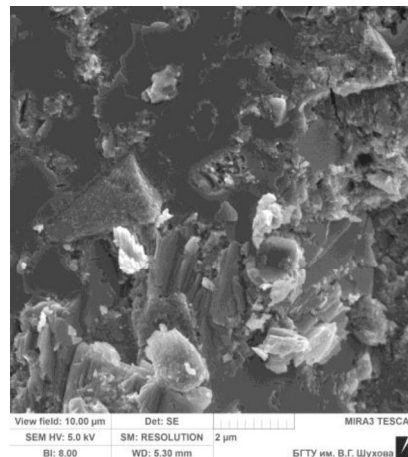


Рис. 7. Микроструктура активированного портландцемента в вибрационной мельнице в возрасте 28 сут твердения

Электронно-микроскопические исследования цементных камней на основе портландцемента и активированного портландцемента показывают, что мелкая фракция зерен портландцемента способствует формированию более плотной структурой (рис. 7), чем образец исходного цемента (рис.6). Микроструктура активированного портландцемента (рис. 7), имеет плотные участки вторичной гидросиликатной структуры

и отдельные участки рыхлой этtringитовой структуры.

Полученные данные подтверждают, что мелкая фракция зерен цемента способствует активному зарастанию объемной пористой структуры композита и формированию уплотняющейся структуры, что обеспечит повышение прочности цементного камня.

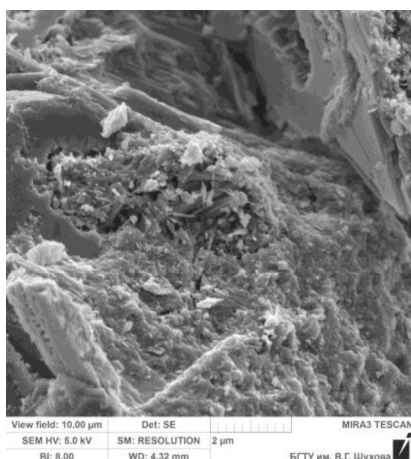


Рис. 8. Микроструктура цементного камня, полученного на неактивированной смеси из портландцемента и вулканического пепла с дозировкой 10 % в возрасте 28 сут твердения

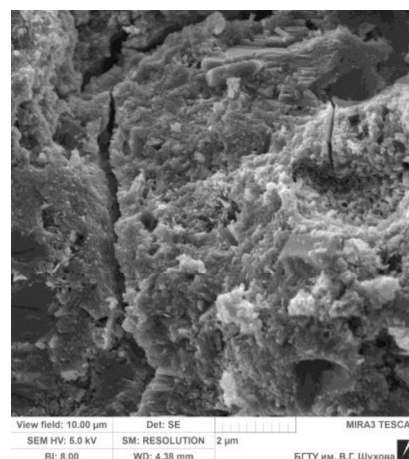


Рис. 9. Микроструктура цементного камня, полученного на активированной в вибрационной мельнице смеси портландцемента и вулканического пепла с дозировкой 10 % в возрасте 28 сут твердения

Сравнивая микроструктуры цементных камней, приготовленных на неактивированной смеси портландцемента с 10 %-ным содержанием вулканического пепла (рис. 8) и активированной такого же состава (рис. 9), следует отметить существенные различия. Так, микроструктура цементного камня из неактивированной смеси характеризуется неравномерной структурой, по всему объему образца отмечаются плотные участки вторичной гидросиликатной структуры и отдельные участки рыхлой структуры (рис. 8). Микроструктура образца цементного камня из активированного смешанного вяжущего характеризуется высокой однородностью структуры (рис. 9),

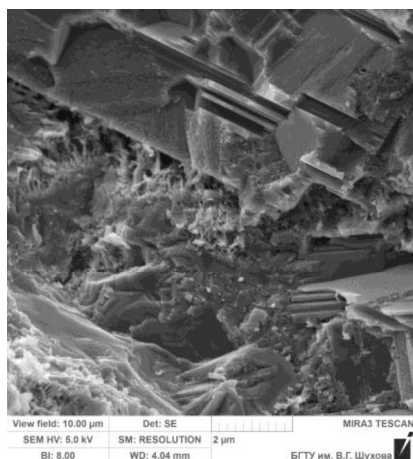


Рис. 10. Микроструктура цементного камня, полученного на неактивированной смеси из портландцемента и вулканического пепла с дозировкой 20 % в возрасте 28 сут твердения

Изучая микроструктуру цементных камней, отформованных из неактивированного (рис. 10) и активированного (рис. 11) смешанных вяжущих с 20 %-ным содержанием вулканического пепла, констатируем, что микроструктура неактивированной смеси имеет неравномерную структуру, по площади скола образца отмечаются разноориентированные плотные участки вторичной гидросиликатной структуры и отдельные слоистые участки рыхлой структуры (рис. 10).

Микроструктура образца цементного камня из активированного смешанного вяжущего обладает высокой однородностью (рис. 11), в сколе образца отчетливо видны плотные сросшимися пластины вторичной гидросиликатной структуры, на поверхностях вторичных гидросиликатных структур формируются кристаллические продукты пуццолановых реакций между частицами пепла и продуктами гидратации цемента.

По мере заполнения этого слоя между частицами пепла и продуктами гидратации цемента постепенно образуются прочные связи, что при-

площадь скола образца представлена плотными сросшимися пластинами вторичной гидросиликатной структуры, по поверхностям вторичных гидросиликатных структур формируются кристаллические продукты пуццолановых реакций между частицами пепла и продуктами гидратации цемента. Даже при слабой пуццолановой реакции водные прослойки заполняются ее продуктами, что способствует упрочнению связей между продуктами гидратации цемента и пеплом, а, значит, и нарастанию прочности цементного камня, особенно на растяжение.

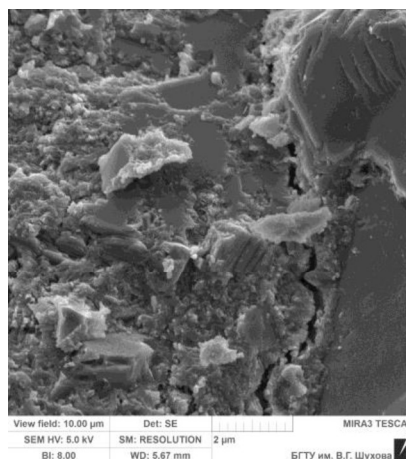


Рис. 11. Микроструктура цементного камня, полученного на активированной в вибрационной мельнице смеси портландцемента и вулканического пепла с дозировкой 20 % в возрасте 28 сут твердения

водит к возрастанию прочности, водонепроницаемости и долговечности. Молекулярные превращения осуществляются в реакционной зоне малой толщины, которая разделяет области, занятые веществами различных химических и минералогических составов (минералами портландцементного клинкера и минеральной добавкой, представленной вулканическим пеплом) и с различным гранулометрическим составом. Фронт реакции в дисперсной среде обусловлен химическими явлениями, локализованными на поверхности раздела дисперсной фазы и среды, т.е. реакционной поверхности раздела. Развитие этой поверхности характеризует кинетику гетерогенного процесса. Для активного протекания реакций необходимо, чтобы реагирующие частицы попадали в реакционную зону, что обеспечивается высокой дисперсией реакционных зон. Во всех случаях реакции твердения сопровождаются диффузией, которая происходит из объема жидкости по направлению высокодисперсного агента к реакционной поверхности и обратно при образовании частиц продуктов реакции. Таким

образом, продукты реакций в виде кристаллических зародышей новой фазы остаются непосредственно вблизи реакционной поверхности раздела, т.е. в объеме реакционной зоны, и образуют со временем пространственную структуру твердого тела. В итоге затвердевший цементный камень с активированным минеральным наполнителем включает множество фаз, таких как продукты гидратации, не прореагировавшие минералы портландцементного клинкера, жидкая фаза и адсорбированная вода и вода, содержащаяся в порах. Таким образом, присутствие в цементном камне минерального наполнителя – вулканического пепла обеспечивает длительный рост прочности, о чем свидетельствует тысячетлетний опыт эксплуатации и долговечность древних римских бетонов.

Результаты физико-механических испытаний активированных цементов свидетельствуют о повышении прочности активированного цемента до 25 %, что обеспечивается высокой удельной поверхностью и созданием условий для активного протекания процессов гидратации в композите.

**Выводы.** Полученные результаты исследований свидетельствуют о влиянии и роли гранулометрического состава смешанных вяжущих, приготовленных на основе портландцемента и вулканического пепла в формировании их микроструктуры и прочности. При получении механическим смешением вяжущих (без помола) с содержанием 10 % вулканического пепла прочность образцов на 13 % выше прочности образцов на основе бездобавочного цемента. Активированные помолом в вибрационной мельнице образцы смешанных вяжущих, с содержанием вулканического пепла в количестве 10 % характеризуются повышением прочности при сжатии на 22 %, одновременно с этим экономится портландцемент до 10 %. Образцы смешанных вяжущих с содержанием вулканического пепла в количестве 20 % соответствуют прочности образцов бездобавочного цемента, позволяя экономить дорогостоящий портландцемент до 20 %. При этом микроструктура образца цементного камня из активированного смешанного вяжущего обладает высокой однородностью.

*Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-29-24113.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Несветайло В.М. Многофункциональные бетоны нового поколения // Технологии бетонов. 2018. № 11-12. С. 46–49.
2. Строителева Е.А. Мелкозернистые бетоны с минеральными добавками // Проектирование

развития региональной сети железных дорог. 2018. № 6. С. 58–62.

3. Хасимова А.С., Морозова Н.Н., Хозин В.Г. Литой бетон на основе композиционного гипсового вяжущего // Технологии бетонов. 2015. № 3-4. С. 23–25.

4. Загороднюк Л.Х., Лесовик В.С., Шамшуров А.В., Беликов Д.А. Композиционные вяжущие на основе органико-минерального модификатора для сухих ремонтных смесей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 5. С.25–31.

5. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Tolmacheva M.M., Smolikov A.A., Shekina A.Y., Shakarna M.H.I. Structure-formation of contact layers of composite materials // Life Science Journal. 2014. № 11. Pp. 948–953.

6. Kuprina A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Elistratkin M.Y. Anisotropy of Materials Properties of Natural and Man-Triggered Origin // Research Journal of Applied Sciences. 2014. №9. Pp. 816–819.

7. Volodchenko A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Volodchenko A.N., Kuprina A.A. The control of building composite structure formation through the use of multifunctional modifiers. Research journal of applied sciences. 2015. № 10. С. 931–936.

8. Volodchenko A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Volodchenko A.N. and Prasolova E.O. Influence Of The Inorganic Modifier Structure On Structural Composite Properties. International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Т. 10. № 19. С. 40617–40622.

9. Попов А.Л., Строкова В.В. Фибропенбетон автоклавного твердения с использованием композиционного вяжущего // Строительные материалы. 2019. № 5. С. 38–44.

10. Елистраткин М.Ю., Минакова А.В., Джамиль А.Н., Куковицкий В.В., Эльян И.Ж.И. Композиционные вяжущие для отделочных составов // Строительные материалы и изделия. 2018. Т. 1. № 2. С. 37–44.

11. Чернышева Н.В., Шаталова С.В., Евсюкова А.С., Фишер Ханц-Бертрам. Особенности подбора рационального состава композиционного гипсового вяжущего // Строительные материалы и изделия. 2018. Т. 1. № 2. С. 45–52.

12. Строкова В.В., Жерновский И.В., Нелюбова В.В., Сумин А.В. Фазовые трансформации при гидратации модифицированного цементного камня // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. Т. 8. № 5-1. С. 199–204.

13. Сумской Д.А. Теплоизоляционный раствор на основе композиционного вяжущего // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т. 80. №2. С. 283–289.

14. Капуста М.Н., Нецвет Д.Д., Дягель И.А., Любимов Д.Н. Повышение эффективности поризованных композитов на основе наноструктурированного вяжущего // Технологии бетонов. 2013. № 3. С. 32–33.

15. Барышников В.Г., Горелов А.М., Панков Г.И. Вторичные материальные ресурсы черной металлургии: справочник, Т. 2. Шлаки, шламы, отходы обогащения железных и марганцевых руд, отходы коксохимической промышленности, железный купорос, образование и использование. М.: Экономика, 1986. 344 с.

16. Рахимбаев Ш.М., Мосьпан В.И., Яшуркаева Л.И., Тарарин В.К. Кинетика помола компонентов портландцементной сырьевой смеси с использованием вторичных продуктов ГОКов КМА. // Современные проблемы строительного материаловедения: материалы седьмых академических чтений РААСН. Белгород, 2001. Ч. 1. С. 450–453.

17. Демьянова В.С., Калашников В.И., Борисов А.А. Об использовании дисперсных наполнителей в цементных системах // Жилищное строительство. 1999. № 1. С. 17–18.

18. Терликовский Е.В., Третник В.Ю. Использование механической активации для модифицирования неорганических материалов // Тезисы докладов V Всесоюзного семинара 8–10 сентября 1987 г. Таллин, 1987. С. 27–28.

19. Комохов П.Г., Шангина Н.Н. Модифицированный цементный бетон его структура и свойства // Цемент и его применение. 2002. №1. С. 43–46.

20. Рахимбаев Ш.М., Тарарин В.К., Каушанский В.Е., Панкратов В.Л., Шелудько В.П.,

Ежова С.Н., Мосьпан В.И. Производство цемента с использованием отходов железнорудных предприятий Курской магнитной аномалии // Цемент. 1987. № 8. С. 16–17

21. Дуда В. Цемент: Пер.с нем. Е.Ш. Фельдмана / Под ред. Б.Э. Юдовича. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.

22. Богданов В.С., Севостьянов В.С., Платонов В.С. Трубные шаровые мельницы с внутренним рециклом // Цемент. 1989. №1. С.15.

23. Молчанов В.И., Селезнева О.Г., Активация измельчением // Докл. VII Всесоюз. симпозиума по механоэмиссии и механохимии твердых тел. Ташкент: Укитувчи, 1981. Т.2. С. 132–136.

24. Румпф Г. Об основных физических проблемах при измельчении // Труды Европ. совещ. по измельчению. М.: Стройиздат, 1966. С. 7–10.

25. Тезисы докладов VIII Всесоюзного симпозиума по механоэмиссии и механохимии твердых тел. Таллин, 1981. 197с.

26. Жан И.Ле. Влияние способа помола клинкера и вторичных составляющих на реакционную способность цемента и на реологию цемента // Труды 7 Междунар. конгр. По химии цемента. Париж, 1980. Т.2. С. 1–252.

27. Юдович Б.Э., Акунов В.И., Цуканов Н.В. Активация цемента при струйном измельчении // Цемент. 1989. №3. С.13–18.

28. Молчанов В.И., Селезнева О.Г., Жирнов Е.Н. Активация минералов при измельчении. М.: Недра, 1988. 208 с.

29. Патент №2381837 РФ, 11.03.2008. Гридчин А.М., Севостьянов В.С., Лесовик В.С., Уральский В.И., Уральский А.В., Сеница Е.В. Помольно-смесительный агрегат. 2010. Бюл. №5.

#### *Информация об авторах*

**Загороднюк Лилия Хасановна**, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: LHZ47@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Махортов Денис Сергеевич**, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: denis.mahortov1995@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Рыжих Владислав Дмитриевич**, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: pr9nik2011@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Сумской Дмитрий Алексеевич**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: pr9nik2011@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Дайронас Марина Владимировна**, кандидат технических наук, доцент кафедры Проектирование зданий городское строительство и хозяйство. E-mail: marishadok2mail.ru. Северо-кавказский филиал Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Россия, 357202, г. Минеральные Воды, ул. Железноводская, д. 24

*Поступила 07.04.2021 г.*

© Загороднюк Л.Х., Махортов Д.С., Рыжих В.Д., Сумской Д.А., Дайронас М.В., 2021



<sup>1,\*</sup>Zagorodnyuk L.Kh., <sup>1</sup>Makhortov D.S., <sup>1</sup>Ryzhikh V.D., <sup>1</sup>Sumskoy D.A., <sup>2</sup>Daironas M.V.

<sup>1</sup>Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov

<sup>2</sup>North Caucasus branch of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

\*E-mail: LHZ47@mail.ru

## ROLE OF GRANULOMETRY OF MIXED BINDERS IN FORMATION OF THEIR MICROSTRUCTURE AND STRENGTH

**Abstract.** A complex system is formed when grinding Portland cement and various mineral fillers. It consists of grains of various sizes with a predominance of a highly dispersed phase. The work investigates the effect of mixed binders prepared on the basis of Portland cement and volcanic ash at various dosages. The analysis of volcanic ash particles is carried out. It is found that the presence of the smallest fractions in the range from 0.3 to 0.07 microns predicts active interaction in the system and the filling of the pore space with hydration products. It has been established that mixed binders obtained by mechanical mixing (without grinding) with a content of 10% volcanic ash have a strength 13 % higher than no addition cement. Mixed binders activated by milling in a vibration mill with a volcanic ash content of 10 % are characterized by an increase in compressive strength by 22%, which saves Portland cement by up to 10 %. Mixed binders with a volcanic ash content of 20% correspond to the strength of cement free. The results obtained indicate the effectiveness and feasibility of using volcanic ash as a mineral component of mixed binders. The microstructure of a cement stone sample from an activated mixed binder is highly homogeneous, dense intergrown plates of a secondary hydrosilicate structure are clearly visible in the sample cleavage, and crystalline products of pozzolanic reactions between ash particles and cement hydration products are formed on the surfaces of secondary hydrosilicate structures. The purpose of this article is to study the role of granulometry of mixed binders in the formation of their microstructure and strength.

**Keywords:** mixed binders, volcanic ash, particle size distribution, microstructure, cement stone strength.

### REFERENCES

1. Nesvetilo V.M. Multifunctional concretes of a new generation [Mnogofunkcionalnie betoni novogo pokoleniya]. Concrete Technologies. 2018. № 11-12. Pp. 46–49. (rus)
2. Stroiteleva E.A. Fine-grained concretes with mineral additives [Melkozernistie betoni s mineralnimi dobavkami]. Designing the development of a regional railway network. 2018. No. 6. Pp. 58–62. (rus)
3. Khasimova A.S., Morozova N.N., Khozin V.G. Cast concrete on the basis of composite gypsum binder [Litoi beton na osnove kompozitsionnogo gipsovogo vyajuschego]. Concrete technologies. 2015. No. 3-4. Pp. 23–25. (rus)
4. Zagorodnyuk L.Kh., Lesovik V.S., Shamshurov A.V., Belikov D.A. Composite binders on the basis of organo-mineral modifier for dry repair mixtures [Kompozitsionnye vyajushchie na osnove organo\_mineralnogo modifikatora dlya suhih remontnih smesei]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2014. No. 5. Pp. 25–31. (rus)
5. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Tolmacheva M.M., Smolikov A.A., Shekina A.Y., Shakarna M.H.I. Structure-formation of contact layers of composite materials. Life Science Journal. 2014. No. 11. Pp. 948–953.
6. Kuprina A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Elistratkin M.Y. Anisotropy of Materials and Natural Resources. Mans-Triggered Origin. Research Journal of Applied Sciences. 2014. No. 9. Pp. 816–819.
7. Volodchenko A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Volodchenko A.N. and Kuprina A.A. The use of multifunctional modifiers. Research journal of applied sciences. 2015. No. 10. Pp. 931–936.
8. Volodchenko A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Volodchenko A.N. and Prasolova E.O. Influence Of Inorganic Modifier Structural Composite Properties. International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. No. 19. Pp. 40617–40622.
9. Popov A.L., Strokova V.V. Autoclaved fibrous foam concrete using a composite binder [Fibropenobeton avtoklavnogo tverdeniya s ispol'zovaniem kompozitsionnogo vyazhushchego] Building Materials. 2019. No. 5. Pp. 38–44. (rus)
10. Elistratkin M.Yu., Minakova A.V., Jamil A.N., Kukovitsky V.V., Elyan I.Zh.I. Composite binders for finishing compounds [Kompozitsionnye vyazhushchie dlya otdelochnykh sostavov]. Building materials and products. 2018. Vol. 1. No. 2. Pp. 37–44. (rus)
11. Chernysheva N.V., Shatalova S.V., Evsyukova A.S., Fisher H.-B. Features of the selection of the rational composition of the composite gypsum binder [Osobennosti podbora ratsional'nogo sostava kompozitsionnogo gipsovogo vyazhushchego] Building materials and products. 2018. Vol. 1. No. 2. Pp. 45–52. (rus)
12. Strokova V.V., Zhernovskiy I.V., Nelyubova V.V., Sumin A.V. Phase transformations during hydration of modified cement stone [Fazovye transformatsii]

matsii pri gidratatsii modifitsirovannogo tsementnogo kamnya]. Transactions of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. 2017. V. 8. No. 5-1. Pp. 199–204. (rus)

13. Sumskoy D.A. Thermal insulation solution based on a composite binder [Teploizolyatsionnyy rastvor na osnove kompozitsionnogo vyazhushchego]. Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2018. V. 80. No. 2. Pp. 283–289. (rus)

14. Cabbage M.N., Netsvet D.D., Diagel I.A., Lyubimov D.N. Improving the efficiency of porous composites based on nanostructured binder [Povyshenie effektivnosti porizovannykh kompozitov na osnove nanostrukturirovannogo vyazhushchego]. Concrete Technologies. 2013. No. 3. Pp. 32–33. (rus)

15. Baryshnikov V.G., Gorelov A.M., Pankov G.I. Secondary material resources of ferrous metallurgy: a handbook, T. 2. Slag, sludge, waste iron and manganese ores, waste from the coking industry, iron sulphate, formation and use [Vtorichnie materialnie resursi chernoi metallurgii spravochnik T. 2. Shlaki shlami othodi obogascheniya jeleznykh i margancevnykh rud othodi koksohimicheskoi promishlennosti jeleznoi kuporos obrazovanie i ispolzovanie]. M.: Economics, 1986. 344 p. (rus)

16. Rakhimbaev Sh.M., Mospan V.I., Yashurkaeva L.I., Tararin V.K. Kinetics of grinding the components of the Portland cement raw mix using secondary products from mining enterprises of the KMA [Kinetika pomola komponentov portlandcementnoi sirevoi smesi s ispolzovaniem vtorichnykh produktov GOKov KMA ] Modern problems of building materials science: materials of the seventh academic readings of the RAACS. Belgorod, 2001. Part 1. Pp. 450–453. (rus)

17. Demyanova V.S., Kalashnikov V.I., Borisov A.A. On the use of dispersed fillers in cement systems [Ob ispolzovanii dispersnykh napolnitelei v cementnykh sistemakh]. Housing construction. 1999. No. 1. Pp. 17–18. (rus)

18. Terlikovsky E.V., Tretnik V.Yu. The use of mechanical activation for modifying inorganic materials [Isolzovanie mehanicheskoi aktivatsii dlya modifitsirovaniya neorganicheskikh materialov]. Abstracts of the V All-Union Seminar of September 8–10, 1987. Tallinn. 1987. Pp. 27–28. (rus)

19. Komokhov P.G., Shangina N.N. Modified cement concrete its structure and properties [Modifitsirovannii cementnii beton ego struktura i svoistva].

Cement and its application. 2002. No. 1. Pp. 43–46. (rus)

20. Rakhimbaev Sh.M., Tararin V.K., Kaushansky V.E., Pankratov V.L., Sheludko V.P., Ezhova S.N., Mospan V.I. Cement production using waste iron enterprises of the Kursk Magnetic Anomaly [Proizvodstvo cementa s ispolzovaniem othodov jeleznorudnykh predpriyatii Kurskoi magnitnoi anomalii]. Cement. 1987. No. 8. Pp. 16–17. (rus)

21. Duda V. Cement: Translated from German E.Sh. Feldman [Tsement: Per.s nem. E.Sh. Fel'dmana]. Ed. B.E. Yudovich. M.: Stroyizdat, 1981. 464 p. (rus)

22. Bogdanov V.S., Sevostyanov V.S., Platonov V.S. Tube ball mills with internal recycle [Trubnye sharovye mel'nitsy s vnutrennim retsiklom]. Cement. 1989. No. 1. Pp. 15. (rus)

23. Molchanov V.I., Selezneva O.G., Activation by grinding [Aktivatsiya izmel'cheniem] Dokl. VII All-Union. Symposium on Mechanoemission and Mechanochemistry of Solids. Tashkent: Ukituvchi, 1981. Vol. 2. Pp. 132–136. (rus)

24. Rumpf G. On the main physical problems in grinding [Ob osnovnykh fizicheskikh problemakh pri izmel'chenii]. Proceedings of Europe. meeting. for grinding. M.: Stroyizdat, 1966. Pp. 7–10.

25. Abstracts of the VIII All-Union Symposium on Mechanoemission and Mechanochemistry of Solids [Tezisy dokladov VIII Vsesoyuznogo simpoziuma po mekhanoemissii i mekhanokhimii tverdykh tel]. Tallinn, 1981. 197 p. (rus)

26. Jean I.Le. Influence of the method of grinding clinker and secondary components on the reactivity of cement and on the rheology of cement [Vliyaniye sposoba pomola klinkera i vtorichnykh sostavlyayushchikh na reaktsionnyuyu sposobnost' tsementa i na reologiyu tsementa]. Proceedings of the 7th Intern. Congr. On the chemistry of cement. Paris, 1980. Vol. 2. Pp. 1–252.

27. Yudovich B.E., Akunov V.I., Tsukanov N.V. Activation of cement during jet grinding [Aktivatsiya tsementa pri struynom izmel'chenii]. Cement. 1989. No. 3. Pp. 13–18. (rus)

28. Molchanov V.I., Selezneva O.G., Zhirnov E.N. Activation of minerals during grinding [Aktivatsiya mineralov pri izmel'chenii]. M.: Nedra, 1988. 208 p. (rus)

29. Patent No. 2381837 RF, 11.03.2008. Gridchin A.M., Sevostyanov V.S., Lesovik V.S., Uralsky V.I., Uralsky A.V., Sinitsa E.V. Grinding and mixing unit. 2010. No. 5.

#### Information about the authors

**Zagorodnyuk, Lilia K.** DSc, Professor. E-mail: LHZ47@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Makhortov, Denis S.** Postgraduate student. E-mail: denis.mahortov1995@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Ryzhikh, Vladislav D.** Postgraduate student. E-mail: pr9nik2011@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Sumskoy, Dmitry A.** PhD. E-mail: pr9nik2011@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Daironas, Marina V.** PhD., associate Professor. E-mail: marishadok2mail.ru. North Caucasus branch of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. Russia, Mineralnye Vody, st. Zheleznovodskaya, 24

---

*Received 07.04.2021*

**Для цитирования:**

Загороднюк Л.Х., Махортов Д.С., Рыжих В.Д., Сумской Д.А., Дайронас М.В. Роль гранулометрии смешанных вяжущих в формировании их микроструктуры и прочности // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 7. С. 33–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-7-33-43

For citation:

Zagorodnyuk L.Kh., Makhortov D.S., Ryzhikh V.D., Sumskoy D.A., Daironas M.V. Role of granulometry of mixed binders in formation of their microstructure and strength. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 7. Pp. 33–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-7-33-43