

**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**  
**BUILDING AND ARCHITECTURE**

УДК 666.94.052



DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-1-200-205 Оригинальная статья / Original article

**Совместное влияние различного состава мелющих тел и поверхностно-активного вещества на эффективность процесса измельчения клинкера**

**А.А. Крутилин, Ф.П. Потапов, Н.А. Инькова, О.К. Пахомова**

Волгоградский государственный технический университет (Себряковский филиал),  
403343, Волгоградская обл., г. Михайловка, ул. Мичурина, 21, Россия

**Резюме. Цель.** В настоящее время измельчение цемента в мельницах осуществляется до удельной поверхности 2500-3000 и 3500-4500 см<sup>2</sup>/г и более. Дальнейшее измельчение клинкера резко ухудшает свойства получаемой продукции. Целью исследования является обеспечение максимальной эффективности процесса измельчения путем определения оптимального совместного влияния различного ассортимента мелющих тел и поверхностно-активного вещества. **Метод.** При измельчении материала вводится поверхностно-активное вещество (ПАВ). В качестве ПАВ – интенсификатора помола, применялся триэталомин (ТЭА). Добавляется триэталомин непосредственно перед помолом в мельницу, в количестве 0,03% в пересчете на сухое вещество от массы, загружаемого в мельницу клинкера. **Результат.** Добавляя поверхностно-активное вещество при измельчении клинкера, можно получить готовый продукт, при этом время измельчения сократится в 1,5 раза. **Вывод.** Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о значительном влиянии различного состава мелющих тел на получаемый зерновой состав и свойства цемента.

**Ключевые слова:** удельная поверхность, измельчение цемента, энергетические затраты, клинкер, ассортимент мелющих тел, барабан, мельница периодического действия

**Для цитирования:** А.А. Крутилин, Ф.П. Потапов, Н.А. Инькова, О.К. Пахомова. Совместное влияние различного состава мелющих тел и поверхностно-активного вещества на эффективность процесса измельчения клинкера. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(1): 200-205. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-1-200-205

**The combined influence of different compositions of grinding media and surfactants on the efficiency of the clinker grinding process**

**A.A. Krutilin, F.P. Potapov, N.A. Inkova, O.K. Pakhomova**

Volgograd State Technical University (Sebryakov Branch),  
21 Michurina Str., Volgograd region, Mikhailovka 403343, Russia

**Abstract. Objective.** Currently, cement is crushed in mills to a specific surface area of 2500-3000 and 3500-4500 cm<sup>2</sup>/g or more. Further grinding of clinker sharply worsens the properties of the resulting product. The purpose of the study is to ensure maximum efficiency of the grinding process by determining the optimal combined influence of a different assortment of grinding media and surfactants. **Method.** When grinding the material, a surfactant (surfactant) is introduced. Triethalamine (TEA) was used as a surfactant – grinding intensifier. Triethalamine is added immediately before grinding into the mill, in an amount of 0.03% in terms of dry matter of the mass of clinker loaded into the mill. **Result.** By adding a surfactant when grinding clinker, you can obtain a finished product, while the grinding time is reduced by 1.5 times. **Conclusion.** The results of experimental studies indicate a significant influence of different compositions of grinding media on the resulting grain composition and properties of cement.

**Keywords:** specific surface area, cement grinding, energy costs, clinker, assortment of grinding media, drum, batch mill

**For citation:** A.A. Krutilin, F.P. Potapov, N.A. Inkova, O.K. Pakhomova. The combined influence of different compositions of grinding media and surfactants on the efficiency of the clinker grinding process. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(1):200-205. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-1-200-205

**Введение.** В настоящее время измельчение цемента в мельницах осуществляется до удельной поверхности 2500-3000 и 3500-4500 см<sup>2</sup>/г и более [1-5]. Дальнейшее измельчение клинкера резко ухудшает свойства получаемой продукции [6-10]. Актуальность темы обусловлена повышенным интересом к снижению материальных и энергетических затрат в процессе измельчения клинкера и получения цемента, соответствующего технологическим требованиям [11-17].

**Постановка задачи.** Целью исследования является обеспечение максимальной эффективности процесса измельчения путем определения оптимального совместного влияние различного ассортимента мелющих тел и поверхностно-активного вещества.

Задачами исследования являются:

1. Провести экспериментальные исследования по измельчению клинкера в лабораторной мельнице.
2. Определить совместное влияние различного ассортимента мелющих тел и поверхностно-активного вещества при измельчении на производительность и удельный расход энергии.
3. Исследовать зерновой состав цемента.

**Методы исследования.** В связи с поставленными задачами, при измельчении материала вводится поверхностно-активное вещество (ПАВ). В качестве ПАВ – интенсификатора помола, применялся триэталомин (ТЭА). Добавляется триэталомин непосредственно перед помолом в мельницу, в количестве 0,03% в пересчете на сухое вещество от массы, загружаемого в мельницу клинкера. Для каждого эксперимента состав мелющих (рис.1) тел представлен в табл. 1.



Рис. 1. Шаровая загрузка

Fig. 1. Ball loading

Таблица 1. Содержание мелющих тел по массе

Table 1. Content of grinding media by weight

| № | Общий вес шаров соответствующего диаметра, кг<br>Total weight of balls of the corresponding diameter, kg |        |        |        |       |       |       |       |
|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
|   | Ø70 мм                                                                                                   | Ø60 мм | Ø40 мм | Ø22 мм | Ø9 мм | Ø8 мм | Ø5 мм | Ø4 мм |
| 1 | 10                                                                                                       | 9      | 20     | 2      | 2     | 4     | 4     | 4     |
| 2 | 10                                                                                                       | 9      | 20     | 4      | 4     | 2     | 2     | 4     |
| 3 | 10                                                                                                       | 9      | 20     | 2      | 4     | 4     | 4     | 2     |
| 4 | 10                                                                                                       | 9      | 20     | 4      | 3     | 3     | 3     | 3     |

Измельчение осуществлялось в типовой лабораторной мельнице (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид модели мельницы периодического действия

Fig. 2. General view of the batch mill model

Она представляет собой барабан с внутренним диаметром 0,5 м, длина камеры равна 0,28 м, объем которой – 0,055 м<sup>3</sup>. Масса дробящей загрузки камеры составляет 55 кг. Количество загружаемого в мельницу материала составляет 14% от общей массы мелющих тел. В качестве исходного материала используется клинкер размером 5,0 – 7,5 мм.

**Обсуждение результатов.** Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что увеличение времени измельчения от 25 мин до 50 мин снижает производительность мельницы при различном составе мелющих тел с добавлением ПАВ (рис. 3).

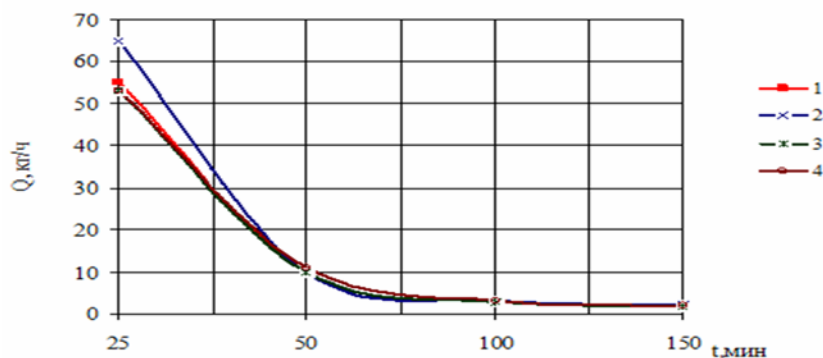


Рис. 3. Экспериментальная зависимость производительности от времени измельчения  $Q = f(t)$  с ПАВ при  $d_{св}=64$  мм и  $n=48$  об/мин: 1 - первый вариант состава мелющих тел; 2 - второй вариант состава мелющих тел; 3 - третий вариант состава мелющих тел; 4 - четвертый вариант состава мелющих тел

Fig. 3. Experimental dependence of productivity on grinding time  $Q = f(t)$  with PAV  $d_{sv}=64$  mm and  $n=48$  rpm: 1 - first version of the composition of grinding media; 2 - second version of the composition of grinding media; 3 - third version of the composition of grinding media; 4 - fourth version of the composition of grinding media

При втором варианте состава мелющих тел (кривая 2 на рис.3) наблюдается максимальное снижение производительности с 65 кг/ч до 10 кг/ч, т.е. на 85%. Рост удельного расход энергии для всех кривых одинаков - с 5 кВт·ч/т до 28 кВт·ч/т, т.е. на 82% (рис. 4).

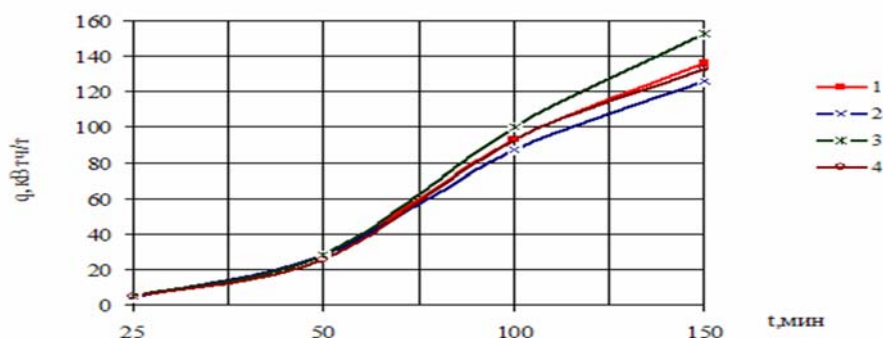


Рис. 4. Экспериментальная зависимость удельного расхода энергии от времени измельчения  $q = f(t)$  с ПАВ при  $d_{св}=64$  мм и  $n=48$  об/мин: 1 - первый вариант состава мелющих тел; 2 - второй вариант состава мелющих тел; 3 - третий вариант состава мелющих тел; 4 - четвертый вариант состава мелющих тел

Fig. 4. Experimental dependence of specific energy consumption on the grinding time  $q = f(t)$  with PAV at  $d_{sv} = 64$  mm and  $n=48$  rpm: 1 - the first variant of the composition of grinding media; 2 - the second variant of the composition of grinding media; 3 - the third variant of the composition of grinding media; 4 - the fourth variant of the composition of grinding media

Дальнейшее увеличение времени измельчения до 100 мин приводит к одинаковому снижению производительности мельницы на 70% при любом составе мелющих тел (кривые 1, 2, 3, 4 на рис.3). Минимальный рост удельного расхода энергии, который составил 68%, наблюдается при втором варианте состава мелющих тел (кривая 2 на рис.4).

Увеличение времени измельчения до 150 мин снижает производительность на 33,3% одинаково при любом составе мелющих тел (кривые 1,2,3,4). Самый минимальный рост удельного расхода энергии - 30% наблюдается при втором варианте состава мелющих тел (кривая 2 на рис.4). Анализируя полученные результаты, можно сделать выводы, что добав-

для ПАВ при измельчении клинкера, можно получить готовый продукт, при этом время измельчения сократится на 50 мин, т.е. в 1,5 раза. Зерновой состав цемента изучался с помощью лазерного анализатора «MicroSizer 201», позволяющего разделить массовые доли зерен цемента в диапазоне от 0,2 до 600 мкм.

На рис. 5 представлен график распределения частиц цемента, по размерам размолото-го различным составом мелющих тел с добавлением ПАВ при аналогичных условиях.

Проанализировав график распределения частиц цемента, по размерам, можно сделать вывод о том, что, измельчая материал с добавлением ПАВ, происходит существенное увеличение доли тонкой фракции размером менее 10 мкм на 13%.

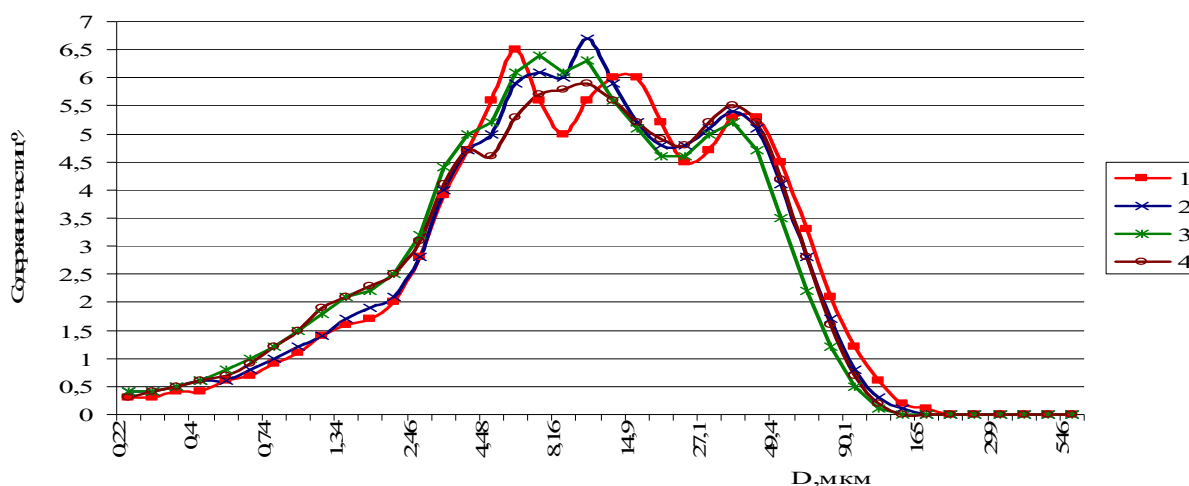


Рис. 5. График распределения частиц цемента, по размерам размолотого с добавлением ПАВ при  $d_{ce}=64$  мм и  $n=48$  об/мин: 1 - первый вариант состава мелющих тел; 2 - второй вариант состава мелющих тел; 3 - вариант состава мелющих тел; 4 - вариант состава мелющих тел

Fig. 5. Graph of the distribution of cement particles, by grinding size, with the addition of PAV at  $d_{sv}=64$  mm and  $n=48$  rpm: 1 - the first variant of the composition of grinding media; 2 - the second variant of the composition of grinding media; 3 - variant of the composition of grinding media; 4 - variant of the composition of grinding media

Так доля частиц размером менее 10 мкм в готовом продукте, измельченном при добавлении ПАВ при первом варианте состава мелющих тел (кривая 1 на рис.5) составила 51,1%, а без ПАВ – 44,5%. Доля частиц размером от 10 мкм до 30 мкм, при измельчении материала с добавлением ПАВ при различных вариантах состава мелющих тел увеличивается на 28%. Это объясняется тем, что введение ПАВ при помоле снижает поверхностную энергию разрушаемого клинкера, уменьшая работу образования новых поверхностей. Кроме того, проникая в трещины и покрывая поверхность клинкера, ПАВ резко увеличивает вероятность развития дефектов структуры.

Доля частиц размером от 40 мкм до 130 мкм без добавления ПАВ при измельчении материала составила 21%, а с добавлением ПАВ 11,9%, что в 1,8 раза меньше. Добавляя ПАВ при измельчении, в готовом продукте частицы размером свыше 130 мкм отсутствуют, а при измельчении материала без добавления ПАВ содержание частиц размером свыше 130 мкм составляет 2%. Удельная поверхность готового продукта с добавлением ПАВ при любом изменении масс мелких мелющих тел увеличивается, за счет увеличения доли частиц размером от 5 мкм до 30 мкм в среднем на 14%. Максимальное увеличение удельной поверхности готового продукта наблюдается при третьем варианте состава мелющих тел с  $3600 \text{ см}^2/\text{г}$  до  $3900\%$ , т.е. на 8%, в остальных случаях удельная поверхность увеличивается в среднем на 6%.

**Вывод.** Возможно получить цемент различных классов, соответствующих технологическим требованиям при минимальных энергетических затратах и высокой производительности. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о значительном влиянии различного состава мелющих тел на получаемый зерновой состав и свойства цемента.

#### Библиографический список:

1. Анненко Д.М. Исследование процессов формирования зернового состава цемента в шаровых мельницах замкнутого цикла. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород, 2009
2. Барбаниягрэ В.Д., Стронин А.А. Исследование влияния диаметра крупного шара в мелющей загрузке мельницы открытого цикла на дисперсные характеристики клинкера. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 5. С. 60-65.
3. Богданов В.С., Анциферов С.И., Богданов Д.В., Сычёв Е.А. Состояние и направления развития техники и технологии измельчения. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 7. С. 110-116.
4. Будникова В.С. Использование интенсификаторов помола для получения цементов. В сборнике: Образование, наука, производство. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2015. С. 26-29.
5. Герасимов М.Д., Латышев С.С., Богданов Н.Э., Локтионов И.О. Обзор конструктивных решений в области создания помольных мельниц. В сборнике: Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. Межвузовский сборник статей. Под редакцией В.С. Богданова. Белгород, 2018. С. 132-146.
6. Жуков В.П., Мизонов В.Е. Оптимальное распределение размеров мелющих тел по длине барабанных мельниц. Теоретические основы химической технологии. 1995. Т. 29. № 6. С. 646-650.
7. Жуков В.П., Ушаков С.Г. Оптимальное распределение по крупности мелющих тел в барабанных мельницах в сборнике: интенсификация процессов механической переработки сыпучих материалов. Межвузовский сборник научных трудов. Иваново, 1987. С. 40-43.
8. Малышев В.П., Бектурганов Н.С., Макашева А.М., Зубрина Ю.С. Вероятностная модель измельчения материалов как оператор самоорганизации и аттрактор процесса. Цветные металлы. 2016. № 2 (878). С. 33-39.
9. Малышев В.П., Зубрина Ю.С., Юн А.Б., Синянская О.М. Адаптация вероятностной модели измельчения к работе шаровых барабанных мельниц. Цветные металлы. 2017. № 10. С. 17-24.
10. Несмеянов Н.П., Бражник Ю.В., Матусов М.Г., Королева Л.А., Денисова Е.М. Влияние физико-механических условий помола цемента на эффективность процесса измельчения в шаровых мельницах. В сборнике: Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. Межвузовский сборник статей. Выпуск посвящен 50-летию кафедры механического оборудования. Белгород, 2020.
11. Несмеянов Н.П., Синцов Д.И., Бузаджи И.С. Интенсификация процесса помола в трубных мельницах. В сборнике: Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. Межвузовский сборник статей. Под ред. В.С. Богданова. Белгород, 2014. С. 185-187.
12. Потапов Ф.П. Интенсификация процесса помола в шаровых барабанных мельницах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород, 2011
13. Сталинский Д.В., Рудюк А.С., Солёный В.К. Эффективность использования мелющих шаров малого диаметра для помола цемента. Сталь. 2022. № 6. С. 15-19.
14. Шарапов Р.Р. Научные основы создания технологических систем помола цемента на основе шаровых мельниц замкнутого цикла. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук/Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2009
15. Шарапов Р.Р. Эффективность помольных систем замкнутого цикла на базе шаровых мельниц. В сборнике: Актуальные проблемы строительной отрасли и образования. Сборник докладов Первой Национальной конференции. 2020. С. 277-282.
16. Шахова Л.Д., Черкасов Р.А. Интенсификация процесса измельчения клинкера с применением интенсификаторов помола. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 4. С. 148-152.
17. Крутилин А.А., Крапчетова Т.В., Инькова Н.А., Пахомова О.К. Зависимость расхода энергии в пересчете на 1м3 бетона при использовании цементов различной удельной поверхности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(1): 133-139. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-133-139

#### References

1. Annenko D.M. study of the processes of formation of the grain composition of cement in closed-cycle ball mills. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. Belgorod, 2009. (In Russ.)
2. Barbanyagre V.D., Stronin A.A. Study of the influence of the diameter of a large ball in the grinding charge of an open circuit mill on the dispersion characteristics of clinker. *Bulletin of V.G. Shukhov Belgorod State Technological University named after..* 2018; 5:60-65. (In Russ.)
3. Bogdanov V.S., Antsiferov S.I., Bogdanov D.V., Sychev E.A. State and directions of development of grinding equipment and technology. *Bulletin of V.G. Shukhov Belgorod State Technological University.* 2022; 7: 110-116. (In Russ.)

4. Budnikova V.S. Use of grinding intensifiers for the production of cements. In the collection: Education, science, production. V.G. Shukhov Belgorod State Technological University 2015;. 26-29.
5. Gerasimov M.D., Latyshev S.S., Bogdanov N.E., Loktionov I.O. Review of design solutions in the field of grinding mills. In the collection: Energy-saving technological complexes and equipment for the production of building materials. *Interuniversity collection of articles*. Ed.by V.S. Bogdanov. Belgorod, 2018: 132-146. (In Russ.)
6. Zhukov V.P., Mizonov V.E. Optimal distribution of grinding media sizes along the length of drum mills. *Theoretical foundations of chemical technology*. 1995; 29(6):646-650. (In Russ.)
7. Zhukov V.P., Ushakov S.G. Optimal size distribution of grinding media in drum mills in a collection: intensification of processes of mechanical processing of bulk materials. *Interuniversity collection of scientific papers*. Ivanovo, 1987; 40-43. (In Russ.)
8. Malyshev V.P., Bekturganov N.S., Makasheva A.M., Zubrina Yu.S. Probabilistic model of materials grinding as a self-organization operator and process attractor. *Non-ferrous metals*. 2016;2(878):33-39.(In Russ.)
9. Malyshev V.P., Zubrina Yu.S., Yun A.B., Sinyanskaya O.M. Adaptation of a probabilistic grinding model to the operation of ball drum mills. *Non-ferrous metals*. 2017;10:17-24. (In Russ.)
10. Nesmeyanov N.P., Brazhnik Yu.V., Matusov M.G., Koroleva L.A., Denisova E.M. The influence of physical and mechanical conditions of cement grinding on the efficiency of the grinding process in ball mills. In the collection: Energy-saving technological complexes and equipment for the production of building materials. *Interuniversity collection of articles*. The issue is dedicated to the 50th anniversary of the Department of Mechanical Equipment. Belgorod, 2020. (In Russ.)
11. Nesmeyanov N.P., Sintsov D.I., Buzadzhi I.S. Intensification of the grinding process in tube mills. In the collection: Energy-saving technological complexes and equipment for the production of building materials. *Interuniversity collection of articles*. Ed. V.S. Bogdanov. Belgorod, 2014:185-187. (In Russ.)
12. Potapov F.P. Intensification of the grinding process in ball drum mills. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, 2011 (In Russ.)
13. Stalinsky D.V., Rudyuk A.S., Soleny V.K. The effectiveness of using small-diameter grinding balls for grinding cement. *Steel*. 2022; 6:15-19. (In Russ.)
14. Sharapov R.R. Scientific basis for creating technological cement grinding systems based on closed-cycle ball mills. Dissertation.Dr. Sci. Eng. V. Shukhov Belgorod State Technological University, 2009 (In Russ.)
15. Sharapov R.R. Efficiency of closed cycle grinding systems based on ball mills. In the collection: Current problems of the construction industry and education. *Collection of reports of the First National Conference*. 2020: 277-282. (In Russ.)
16. Shakhova L.D., Cherkasov R.A. Intensification of the clinker grinding process using grinding intensifiers. *Bulletin of V.G. Shukhov Belgorod State Technological University* 2014; 4: 148-152. (In Russ.)
17. A.A. Krutinin, T.V. Krapchetova, N.A. Inkova, O. K. Pakhomova. Dependence of energy consumption in terms of 1 m<sup>3</sup> of concrete when using cements of different specific surface. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2022; 49(1):133-139. (In Russ.)

**Сведения об авторах:**

Крутинин Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительные материалы и специальные технологии»; [kotyra84@bk.ru](mailto:kotyra84@bk.ru) ORCID 0000-0002-2116-5192

Потапов Федор Петрович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительные материалы и специальные технологии»; [efedrin.ru@yandex.ru](mailto:efedrin.ru@yandex.ru) ORCID 0000-0003-0534-6396

Инькова Надежда Александровна, старший преподаватель, кафедра «Строительные материалы и специальные технологии»; [coyote@bk.ru](mailto:coyote@bk.ru) ORCID 0000-0002-3108-3465

Пахомова Олеся Константиновна, старший преподаватель, кафедра «Строительные материалы и специальные технологии»; [pahomovaolesia@yandex.ru](mailto:pahomovaolesia@yandex.ru) ORCID 0000-0002-7156-9988

**Information about authors:**

Alexander A.Krutinin, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Materials and Special Technologies; [koty-ra84@bk.ru](mailto:koty-ra84@bk.ru) ORCID 0000-0002-2116-5192

Fedor P. Potapov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Construction Materials and Special Technologies; [efedrin.ru@yandex.ru](mailto:efedrin.ru@yandex.ru) ORCID 0000-0003-0534-6396

Nadezhda A.Inkova, Senior Lecturer, Department of Building Materials and Special Technologies, [coyote@bk.ru](mailto:coyote@bk.ru) ORCID 0000-0002-3108-3465

Olesya K.Pakhomova, Senior Lecturer, Department of Building Materials and Special Technologies; [pahomovaole-sia@yandex.ru](mailto:pahomovaole-sia@yandex.ru) ORCID 0000-0002-7156-9988

**Конфликт интересов/Conflict of interest.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.**

**Поступила в редакцию/ Received** 29.11.2023.

**Одобрена после рецензирования / Revised** 23.12.2023.

**Принята в печать /Accepted for publication** 23.12.2023.