

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 697.112.2

DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-195-201



Оригинальная статья / Original article

**Влияние средневзвешенного диаметра шара на размер частиц
конечного продукта**

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 см²/г и более. Дальнейшее измельчение клинкера резко ухудшает свойства получаемой продукции. Актуальность темы обусловлена повышенным интересом к снижению материальных и энергетических затрат в процессе измельчения клинкера. Целью исследования является изучение влияния различного ассортимента мелющих тел и средневзвешенного диаметра шара на размер частиц конечного продукта, выполняя анализ размера частиц путем дифракции частиц. **Метод.** Для получения достоверных экспериментальных данных использовалась специально разработанная модель помольного агрегата. Анализ размера частиц путем их дифракции или пространственного распределения (спектра рассеяния) рассеянного света, осуществлялся с помощью лазерного анализатора. **Результат.** Разработана методика исследований, отвечающая современным возможностям техники эксперимента. Проведены экспериментальные исследования по измельчению клинкера в лабораторной мельнице. Определено совместное влияние различного ассортимента мелющих тел и средневзвешенного диаметра шара на размер частиц конечного продукта. **Вывод.** Исследования кри-вых конечного продукта, полученного при использовании различного средневзвешенного диаметра шара, показали, что для измельчения мелких зерен не требуется большой энергии удара, диаметр мелющих тел должен снижаться по мере уменьшения размера зерен материала. Поэтому шары должны быть минимального диаметра, но достаточного для разрушения частиц материала.

Ключевые слова: дифракция частиц, лазерный анализатор, конечный продукт, клинкер, помол, средневзвешенный диаметр шара, мельница периодического действия

Для цитирования: А.А.Крутилин, Ф.П. Потапов, Н.А. Инькова, О.К. Пахомова. Влияние средневзвешенного диаметра шара на размер частиц конечного продукта. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(3):195-201. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-195-201

**The influence of the weighted average diameter of the ball on the particle size
of the final product**

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 cm²/g or more. Further grinding of clinker sharply worsens the properties of the resulting product. The relevance of the topic is due to the increased interest in reducing material and energy costs in the process of clinker grinding. The purpose of the work is to study the effect of different assortment of grinding media and weighted average ball diameter on the particle size of the final product, performing particle size analysis by particle diffraction. **Method.** To obtain reliable experimental data, a specially developed model of the grinding unit was used. Analysis of particle size by diffraction or spatial distribution (scattering spectrum) of scattered light was carried out using a laser analyzer. **Result.** A research methodology has been

developed that meets the modern capabilities of experimental technology. Experimental studies have been conducted on clinker grinding in a laboratory mill. The combined effect of different assortments of grinding bodies and the average weighted diameter of the ball on the particle size of the final product has been determined. **Conclusion.** Studies of the curves of the final product obtained using different weighted average ball diameters have shown that large impact energy is not required to grind small grains; the diameter of the grinding bodies should decrease as the grain size of the material decreases. Therefore, the balls must have a minimum diameter, but sufficient to destroy the particles of the material.

Keywords: particle diffraction, laser analyzer, final product, clinker, grinding, weighted average ball diameter, batch mill

For citation: A.A. Krutinin, F.P. Potapov, N.A. Inkova, O.K. Pakhomova. The influence of the weighted average diameter of the ball on the particle size of the final product. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(3):195-201. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-195-201

Введение. В настоящее время измельчение цемента в мельницах осуществляется до удельной поверхности 2500-3000 и 3500-4500 см²/г и более. Дальнейшее измельчение клинкера резко ухудшает свойства получаемой продукции.

Актуальность темы обусловлена повышенным интересом к снижению материальных и энергетических затрат в процессе измельчения клинкера и получения цемента, соответствующего технологическим требованиям.

Постановка задачи. Целью исследования является изучение влияния различного ассортимента мелющих тел и средневзвешенного диаметра шара на размер частиц конечного продукта, выполняя анализ размера частиц путем дифракции частиц.

Для достижения цели исследования были определены задачи:

1. Провести экспериментальные исследования по измельчению клинкера в лабораторной мельнице.
2. Определить совместное влияние различного ассортимента мелющих тел и средневзвешенного диаметра шара на размер частиц конечного продукта.
3. Исследовать зерновой состав цемента.
4. Сформулировать соответствующие выводы по результатам проведенного исследования.

Для получения достоверных экспериментальных данных использовалась специально разработанная модель помольного агрегата (рис. 1) и разработана методика исследований, отвечающая современным возможностям техники эксперимента.



Рис.1. Модель помольного агрегата
Fig. 1. Grinding unit model

Анализ размера частиц путем дифракции частиц или пространственного распределения (спектра рассеяния) рассеянного света, осуществлялся с помощью лазерного анализатора.

На рис. 2 представлено распределение частиц конечного продукта, полученного при использовании средневзвешенного диаметра шара 25 мм.

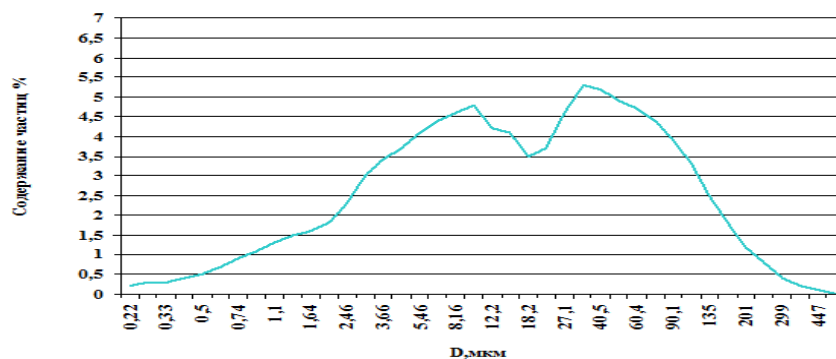


Рис. 2. Зависимость содержания частиц конечного продукта от размера

Fig. 2. Dependence of the particle content of the final product on size

Как видно из рис. 2 кривая имеет два ярко выраженных пика. Первый пик представлен фракциями от 0,22 мкм до 14 мкм. Вершина данного пика образована максимальным содержанием частиц 4,8%. Масса частиц данного пика составляет 49,3%.

Второй пик представлен фракциями от 22 и до 555 мкм. Максимальное содержание частиц данного пика представлено вершиной с содержанием частиц 5,3%. Масса частиц данного пика составляет 43,6%.

На рис. 3 представлено распределение частиц конечного продукта, полученного при использовании средневзвешенного диаметра шара 33 мм.

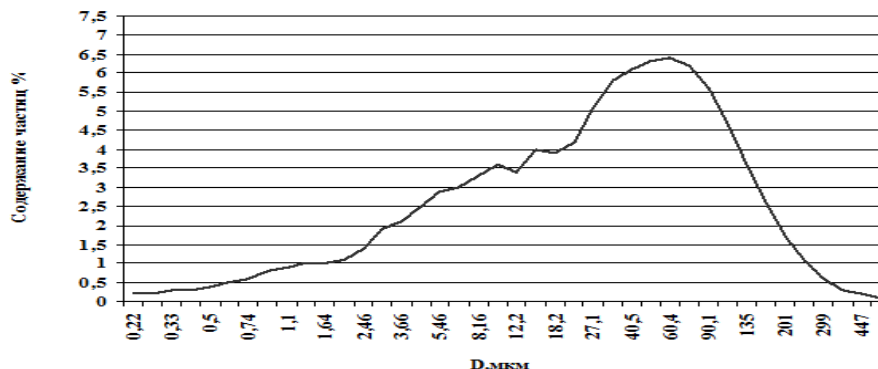


Рис. 3. Зависимость содержания частиц конечного продукта от размера

Fig. 3. Dependence of the particle content of the final product on size

Первый пик представлен фракциями от 0,22 мкм до 12,2 мкм. Вершина данного пика образована максимальным содержанием частиц 3,6% . Масса частиц данного пика составляет 31,4%.

Второй пик представлен фракциями от 12,2 и до 18,2 мкм. Максимальное содержание частиц данного пика представлено вершиной с содержанием частиц 4%. Масса частиц данного пика составляет 7,9%. Разделяющей этих двух пиков служит фракцией 12,2 мкм с содержанием частиц 3,4%.

Третий пик представлен фракциями от 18,2 и до 555 мкм. Максимальное содержание частиц данного пика представлено вершиной с содержанием частиц 6,4%. Масса частиц данного пика составляет 60,7%. Разделяющей второго и третьего пиков служит фракцией 18,2 мкм с содержанием частиц 3,9%. Содержание тонкой фракции размером (-5мкм) равно 15,1%. Содержание средней фракции размером (+5 -30мкм) равно 33,5%.

На рис. 4 представлено распределение частиц конечного продукта, полученного при использовании средневзвешенного диаметра шара 34 мм.

Первый пик представлен фракциями от 0,22 мкм до 12,2 мкм. Вершина данного пика образована максимальным содержанием частиц 3,7% . Масса частиц данного пика составляет 33,1%.

Второй пик представлен фракциями от 12,2 и до 18,2 мкм. Максимальное содержание частиц данного пика представлено вершиной с содержанием частиц 3,7%. Масса частиц данного пика составляет 8,3%. Разделяющей этих двух пиков служит фракцией 12,2 мкм содержанием частиц 3,3%.

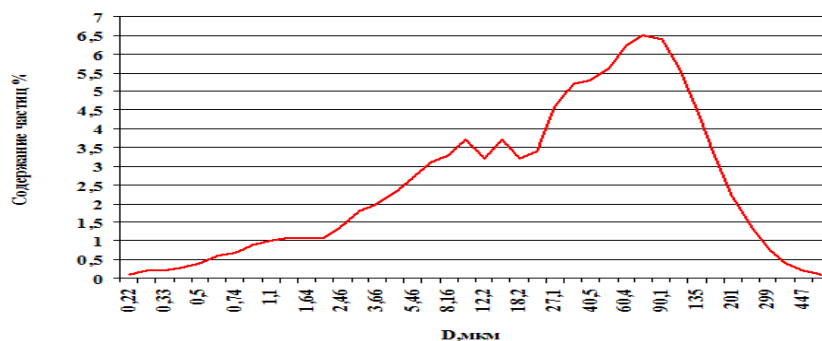


Рис. 4. Зависимость содержания частиц конечного продукта от размера

Fig. 4. Dependence of the particle content of the final product on size

Третий пик представлен фракциями от 18,2 и до 555 мкм. Максимальное содержание частиц данного пика представлено вершиной с содержанием частиц 6,5%. Масса частиц данного пика составляет 63,2%. Разделяющей второго и третьего пиков служит фракцией 18,2 мкм с содержанием частиц 3,3%. На рис. 5 представлено распределение частиц конечного продукта, полученного при использовании средневзвешенного диаметра шара 35 мм.

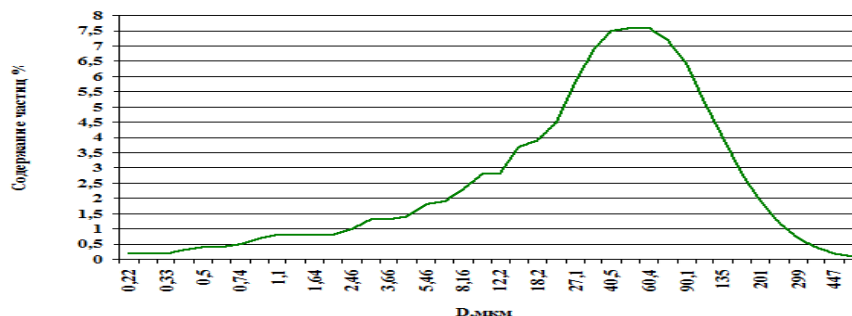


Рис. 5. Зависимость содержания частиц конечного продукта от размера

Fig.5. Dependence of the particle content of the final product on size

Как видно из рис. 5 кривая имеет один ярко выраженный пик. Основная масса (более 90%) частиц представлена фракциями от 2 до 555 мкм, с максимальным содержанием фракции 44,5 – 54,3 мкм 7,6%. Содержание тонкой фракции размером (-5мкм) равно 11%. Содержание средней фракции размером (+5 -30мкм) равно 29,4%.

Обсуждение результатов. Анализ ранее полученных данных (рис. 6) показывает, что во всех случаях после помола характер кривых содержания частиц конечного продукта остается неизменным, наблюдается лишь сужение диапазонов размеров частиц, за счет исчезновения наиболее мелкой фракции, а также происходит перераспределение частиц по размерам.

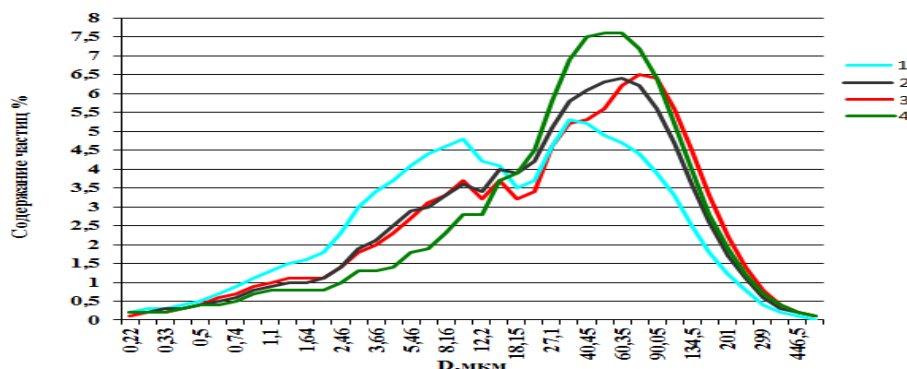


Рис. 6. Зависимости содержания частиц конечного продукта от размера: 1 - средневзвешенный диаметр шарам - 25 мм; 2 - средневзвешенный диаметр шарам - 33 мм; 3 - средневзвешенный диаметр шара - 34 мм; 4- средневзвешенный диаметр шара - 35 мм

Fig. 6. Dependence of the particle content of the final product on size: 1 - weighted average diameter of the balls - 25 mm; 2 - weighted average diameter of the balls - 33 mm; 3 - weighted average diameter of the ball - 34 mm; 4- weighted average ball diameter - 35 mm

Для того чтобы лучше проследить влияние различного средневзвешенного диаметра шара на размер частиц конечного продукта, кривые, представленные на рис. 6 были разбиты на два интервала.

Первый интервал представлен фракциями от 0,22 мкм до 18,15 мкм. Как видно все кривые имеют один четко выраженный пик.

Следует обратить внимание, на значительный рост содержания частиц (кривая 1). Вершина данного пика образована максимальным содержанием частиц 4,8% размером 10,18 мкм. Кривые 2 и 3 имеют одинаковый характер роста. Вершина пика, образованная максимальным содержанием частиц 4% размером 12,2 мкм (кривая 2). Вершина пика, образованная максимальным содержанием частиц 3,7% размером 8,16 мкм (кривая 3).

Максимальное содержание частиц (кривая 4) 3,8% размером 18,15 мкм.

Проанализировав характер поведения всех кривых на данном интервале, можно сделать вывод, что с увеличением средневзвешенного диаметра шаров, содержание мелких частиц снижается.

Второй интервал представлен фракциями от 18,15 мкм до 555 мкм. Как видно все кривые имеют также один четко выраженный пик.

Следует обратить внимание, на значительный рост содержания частиц (кривая 4). Вершина данного пика образована максимальным содержанием частиц 7,6% размером 60,35 мкм.

Кривые 2 и 3 имеют одинаковое максимальное содержание частиц в области 6,5%. Вершина пика кривой 2 образована частицами размером 50,2 мкм, кривой 3 – 75,2 мкм.

Минимальное содержание частиц в данном интервале наблюдается у кривой 1, вершина пика образована максимальным содержанием частиц 5,4% размером 27,1 мкм.

Снижение значения содержания частиц кривой 1 на данном интервале можно объяснить тем, что измельчающая загрузка со средневзвешенным диаметром шара равным 25 мм подобрана с учетом кинетической энергии мелющих тел, в основном состоит из мелких шаров, что создает более плотную упаковку по сравнению с загрузкой из крупных шаров. Состав данной шаровой загрузки улучшает процесс измельчения частиц размером от 0,22 до 18,15 мкм за счет повышения попадания зерен измельчаемого материала под удар мелющих тел.

Вывод. Исследования кривых конечного продукта, полученного при использовании различного средневзвешенного диаметра шара, показали:

1. Для измельчения мелких зерен не требуется большой энергии удара, диаметр мелющих тел должен снижаться по мере уменьшения размера зерен материала. Поэтому шары должны быть минимального диаметра, но достаточного для разрушения частиц материала.

2. За счет снижения содержания крупных шаров можно улучшить процесс измельчения и повысить производительность мельницы.

3. Шаровая мельница работает эффективнее, если по длине её камеры создано соответствие между размером зерен измельчаемого материала и диаметром мелющих тел.

4. Применение мелких шаров свидетельствует о том, что процесс измельчения ударом в точках соприкосновения мелких шаров эффективен.

Библиографический список:

1. Барбанягрэ 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.
2. 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.
3. Вайтехович П.Е., Семененко Д.В. Влияние взаимодействия между мелющими телами на характер их движения в планетарной мельнице. Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2010. № 9. С. 13-15.

4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Козловский В.И., Вайтехович П.Е., Камлюк Т.В. Влияние размера мелющих тел на эффективность диспергирования материала в шаровой мельнице с мешалкой. Труды БГТУ. №3. Химия и технология неорганических веществ. 2016. № 3 (185). С. 136-141.
8. Коновалов Д.А. Изучение влияния ассортимента мелющих тел на основные дисперсионные показатели цемента и его свойства. В сборнике: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. С. 197-201.
9. 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.
10. 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.
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. Ханин С.И., Старченко Д.Н. Закономерности процесса движения мелющих тел в корпусе шаровой барабанной мельницы. Монография / Белгород, 2013.
15. Шарапов Р.Р. Научные основы создания технологических систем помола цемента на основе шаровых мельниц замкнутого цикла. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород, 2009
16. 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. Белгород, 2009
17. 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.
18. 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.

References:

1. 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 Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova*. 2018; 5:60-65.(In Russ)
2. Budnikova V.S. Use of grinding intensifiers for the production of cements. In the collection: Education, science, production. *Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova*. 2015; 26-29. (In Russ)
3. Vaitekhovich P.E., Semenenko D.V. The influence of interaction between grinding bodies on the nature of their movement in a planetary mill. *Chemical and oil and gas engineering*. 2010;9:13-15. .(In Russ)
4. 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. Edited by V.S. Bogdanov*. Belgorod, 2018;132-146. (In Russ)
5. 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)

6. 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)
7. Kozlovsky V.I., Vaitekhovich P.E., Kamlyuk T.V. The influence of the size of grinding media on the efficiency of material dispersion in a ball mill with a stirrer. *Proceedings of BSTU. No. 3. Chemistry and technology of inorganic substances*. 2016;3 (185):136-141.(In Russ)
8. Kononov D.A. Study of the influence of an assortment of grinding media on the main dispersion parameters of cement and its properties. In the collection: International scientific and technical conference of young scientists of BSTU named after. V.G. Shukhova. 2017;197-201.(In Russ)
9. 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)
10. 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)
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. *Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova*. Belgorod, 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. Khanin S.I., Starchenko D.N. Regularities of the process of movement of grinding media in the body of a ball drum mill. Monograph. Belgorod, 2013.(In Russ)
15. Sharapov R.R. Scientific basis for creating technological cement grinding systems based on closed-cycle ball mills. Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. *Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova*. Belgorod, 2009. (In Russ)
16. Sharapov R.R. Scientific basis for creating technological cement grinding systems based on closed-cycle ball mills. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. *Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova*. Belgorod, 2009. (In Russ)
17. 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)
18. Shakhova L.D., Cherkasov R.A. Intensification of the clinker grinding process using grinding intensifiers. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova*. 2014;4:148-152.(In Russ)

Сведения об авторах:

Крутилин Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительные материалы и специальные технологии»; 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, ORCID 0000-0003-0534-6396.

Надежда Александровна Инькова, старший преподаватель, кафедра «Строительные материалы и специальные технологии»; coyote@bk.ru 0000-0002-3108-3465.

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

Information about the authors:

Alexander A. Krutinin, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Materials and Special Technologies; koty-ra84@bk.ru

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

Nadezhda A. Inkova, Senior Lecturer, Department of Building Materials and Special Technologies; coyote@bk.ru

Olesya K. Pakhomova, Senior Lecturer, Department of Building Materials and Special Technologies; pahomovaole-sia@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 26.03.2024.

Одобрена после рецензирования / Revised 04.05.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 04.05.2024.