

# ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI:10.12737/article\_5af5a72b1f2cd3.23068604

Барбанягрэ В.Д., д-р техн. наук, проф.,  
Стронин А.А., магистрант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИАМЕТРА КРУПНОГО ШАРА В МЕЛЮЩЕЙ ЗАГРУЗКЕ МЕЛЬНИЦЫ ОТКРЫТОГО ЦИКЛА НА ДИСПЕРСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛИНКЕРА

aleksandr.stronin@rambler.ru

На многих действующих цементных заводах Российской Федерации для измельчения цемента используют шаровую мельницу с низким КПД до 3,5 %. Большая часть подведенной к мельнице энергии преобразуется в тепло, трение, звук и вибрацию, а сравнительно небольшая ее часть используется непосредственно для измельчения материала, т.е. накапливается в шаровой загрузке в виде потенциальной энергии. Сам процесс измельчения в подобном помольном агрегате затруднен из-за наличия таких отрицательных явлений как агрегация материала, его налипание на мелющие шары и бронефутеровку мельницы. Подобные явления наиболее сильно проявляются на участке тонкого измельчения, соответствующего для большинства действующих на сегодняшний день цементных мельниц, второй камере. Вследствие указанных причин, сильно возрастает удельный расход электроэнергии, затрачиваемой на помол, значительно снижается производительность цементной мельницы. По этой причине, узким местом технологии производства цемента любых марок является цех помола. Существует много путей, обеспечивающих интенсификацию процесса тонкого измельчения в мельнице. Одним из таких способов является рациональный подбор мелющих тел, обеспечивающий возможность более полного использования полезной мощности мельницы непосредственно для измельчения размалываемого материала. Оптимальный состав мелющей загрузки, особенно в камере тонкого помола, за счет увеличения степени истирающего воздействия на размалываемый материал, позволит снизить удельный расход электроэнергии, и тем самым увеличить производительность помольного агрегата. Авторами данной статьи исследовано влияние диаметра крупного шара в загрузке, соответствующей второй камере мельницы, на дисперсные характеристики размалываемого клинкера. В качестве параметров характеризующих тонкость помола материала, выступили удельная поверхность и величина полного остатка на сите № 008.

**Ключевые слова:** дисперсные характеристики клинкера, измельчение клинкера, шаровая мельница, ассортимент мелющих тел, тонкость помола, открытый цикл.

Цемент является одним из важнейших вяжущих материалов, нашедший очень широкое применение в строительстве. С 2010 по 2017 года средний объем потребления цемента в РФ составил 60 млн. т./год, а в 2018 году, согласно прогнозам, ожидается его увеличение на 3% [1]. Каждый производитель стремится увеличить объем

выпускаемой продукции, с одновременным снижением энергетических затрат, с тем чтобы занять большую долю рынка сбыта. Завершение производства готового продукта и формирование его качества происходит в цементной мельнице, в России наиболее широкое применение получила трубная шаровая мельница открытого цикла [2].



Рис. 1. Динамика рынка цемента в РФ в период с 2010 по 2017 года

Процесс измельчения цемента очень энергоемок, т. к. удельный расход электроэнергии составляет от 35 до 45 кВтч/т цемента [3]. Учитывая увеличение темпов строительства, способствующих возрастанию спроса на быстротвердеющие и высокопрочные цементы [4], получение которых связано с еще большими энергетическими затратами, т.к. в данном случае полный остаток на сите № 008 должен быть ниже 1% [5]. В связи с этим возникает необходимость в поисках путей интенсификации процесса помола материала до высоких значений дисперсностей с минимально возможной энергоемкостью самого процесса измельчения без снижения и/или увеличения производительности цементной мельницы.

Пропускная способность мельницы определяется заданной тонкостью помола цемента, и чем она выше, тем ниже производительность и выше удельный расход электроэнергии [6]. Причины, снижающие производительность мельницы и увеличивающие энергоемкость процесса, заключаются в возникновении явления агрегации материала и его налипания на мелющие тела и бронифутеровку мельницы при длительном измельчении материала, а также нерациональный подбор ассортимента мелющих тел [7].

В данной работе проводился подбор рационального состава мелющей загрузки, состоящей из двух типов шаров: крупного и мелкого. Целью исследований было установление оптимального диаметра крупного шара во второй камере, обеспечивающего интенсификацию процесса измельчения клинкера в мельнице и способствующего увеличению ее производительности без снижения дисперсных характеристик цемента. Диаметр крупного шара в каждом эксперименте был разным, и принимал следующие значения: 74; 60; 40 и 25 мм.

Исследования проводили на мельнице ГИПРОЦЕМента 0,5×0,56 м, в которую загружался клинкер массой 4 кг фракции 10 – 0 мм без добавления к нему гипса. Во всех экспериментах клинкер измельчался в первой камере на загрузке Ø74/Ø54, представляющую собой плотную шаровую упаковку (ПШУ) [8,9], в течение первых 10 мин, затем этот ассортимент извлекался и загружался исследуемый. Плотная шаровая загрузка Ø74/Ø54 имела следующие характеристики: соотношение по массе Ø74:Ø54=2:1, коэффициент загрузки 0,2, общая масса мелющих тел 55 кг.

Во второй камере время помола составляло 25 мин, поэтому общее время помола – 35 мин. Через 10; 25 и 35 мин от измельченного клинкера отбирались пробы для определения значения удельной поверхности и остатка на ситах № 125;

09; 063; 0315; 02 и 008. На первых пяти ситах рассев осуществляли ручным способом, а на двух оставшихся – механическим. Удельную поверхность определяли методом воздухопроницаемости на ПМЦ – 500.

В таблицах 1–4 представлены результаты исследований, а для удобства на рисунках 2 и 3 в виде гистограмм показаны те же экспериментальные данные. Из этих данных хорошо видно, что первая камера мельницы, содержащая ПШУ мелющих тел, во всех опытах обеспечивала получение измельченного материала с одинаковыми дисперсными характеристиками. Удельная поверхность лежала в интервале 150–168 м<sup>2</sup>/кг, а полный остаток на сите №008 50,2–54,0 %. Данный факт позволяет утверждать, что первая камера мельницы в равной и достаточной степени подготавливала размалываемый материал перед подачей его в следующую камеру, следовательно, все расхождения в значениях дисперсных характеристик у измельченного клинкера полностью обусловлены составом мелющей загрузки второй камеры, что значительно облегчает проведение сравнительного анализа полученных результатов в рамках научно-исследовательской работы.

Согласно полученным результатам следует, что измельченные клинкера, полученные при использовании мелющей загрузки с крупным шаром размером 60 мм и с шаром 25 мм, имеют совершенно одинаковые значения дисперсных характеристик на протяжении всего процесса измельчения клинкера, так на 35 мин помола в первом случае  $R_{008} = 0,7 \%$ ,  $S_{уд} = 419 \text{ м}^2/\text{кг}$  (табл. 2), а во втором –  $R_{008} = 0,6 \%$ ,  $S_{уд} = 412 \text{ м}^2/\text{кг}$  (табл. 4).

Добавление к мелким шарам крупного шара диаметром 74 мм равносильно добавлению к ним шара Ø40. Об этом свидетельствует тот факт, что на протяжении всего процесса измельчения клинкера, последний имел одинаковые значения дисперсных параметров на обеих мелющих загрузках. Так за 35 мин помола материала во второй камере с шарами Ø74, удельная поверхность составила 385 м<sup>2</sup>/кг, а полный остаток на сите № 008–1,8 % (табл. 1). Замена вышеуказанного крупного шара на Ø40 привела к следующим значениям рассматриваемых параметров:  $S_{уд} = 382 \text{ м}^2/\text{кг}$ ,  $R_{008} = 1,7 \%$  (табл. 3).

Производительность мельницы оценивалась по количеству времени, которое необходимо затратить для достижения клинкером величины удельной поверхности 300 – 350 м<sup>2</sup>/кг и полного остатка на контрольном сите № 008 не превышающим 15 %. Математические расчеты показали, что во всех опытах производительность мельницы равнялась 9,6 кг/ч.

Таблица 1

**Дисперсные характеристики клинкера, полученного на загрузке с шарами Ø74**

Мелющая загрузка	Удельная поверхность $S$ , м <sup>2</sup> /кг	Приращение удельной поверхности $\Delta S$ , м <sup>2</sup> /кг	Полный остаток на сите № 008, %	Общее время помола, мин
I камера Ø74/Ø54 = 2:1	168	0	54,0	10
Мелкие шары + Ø74	314	146	6,4	25
	385	71	1,8	35

Таблица 2

**Дисперсные характеристики клинкера, полученного на загрузке с шарами Ø60**

Мелющая загрузка	Удельная поверхность $S$ , м <sup>2</sup> /кг	Приращение удельной поверхности $\Delta S$ , м <sup>2</sup> /кг	Полный остаток на сите № 008, %	Общее время помола, мин
I камера Ø74/Ø54 = 2:1	155	0	51,4	10
Мелкие шары + Ø60	347	192	4,2	25
	419	72	0,7	35

Таблица 3

**Дисперсные характеристики клинкера, полученного на загрузке с шарами Ø40**

Мелющая загрузка	Удельная поверхность $S$ , м <sup>2</sup> /кг	Приращение удельной поверхности $\Delta S$ , м <sup>2</sup> /кг	Полный остаток на сите № 008, %	Общее время помола, мин
I камера Ø74/Ø54 = 2:1	150	0	52,2	10
Мелкие шары + Ø40	326	176	6,0	25
	392	66	1,7	35

Таблица 4

**Дисперсные характеристики клинкера, полученного на загрузке с шарами Ø25**

Мелющая загрузка	Удельная поверхность $S$ , м <sup>2</sup> /кг	Приращение удельной поверхности $\Delta S$ , м <sup>2</sup> /кг	Полный остаток на сите № 008, %	Общее время помола, мин
I камера Ø74/Ø54 = 2:1	157	0	50,2	10
Мелкие шары + Ø25	346	189	3,0	25
	412	66	0,6	35

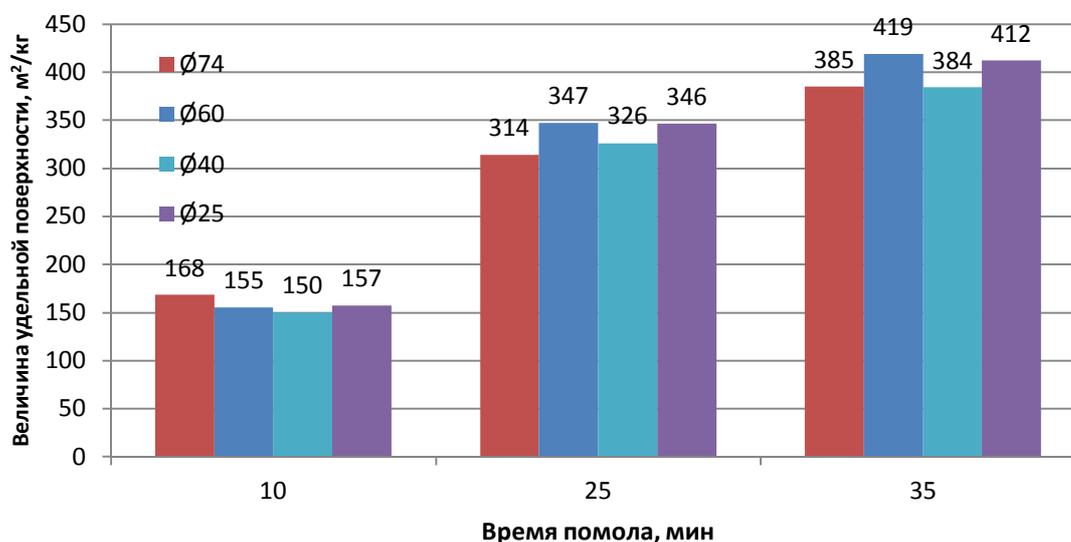


Рис. 2. Зависимость удельной поверхности клинкера от времени помола

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы. В шаровой загрузке второй камеры эффективность использования шаров диаметром 60 и 25 мм одинакова во всех случаях, даже, когда требуется получить тонкодисперсный материал, характеризующийся высокой удельной поверхностью (более  $400 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) и низким остатком на сите № 008 (до 1 %).

Следует также отметить, что материал, измельченный во второй камере на загрузках с использованием крупных шаров  $\text{Ø}60$  и  $\text{Ø}25$ , имел

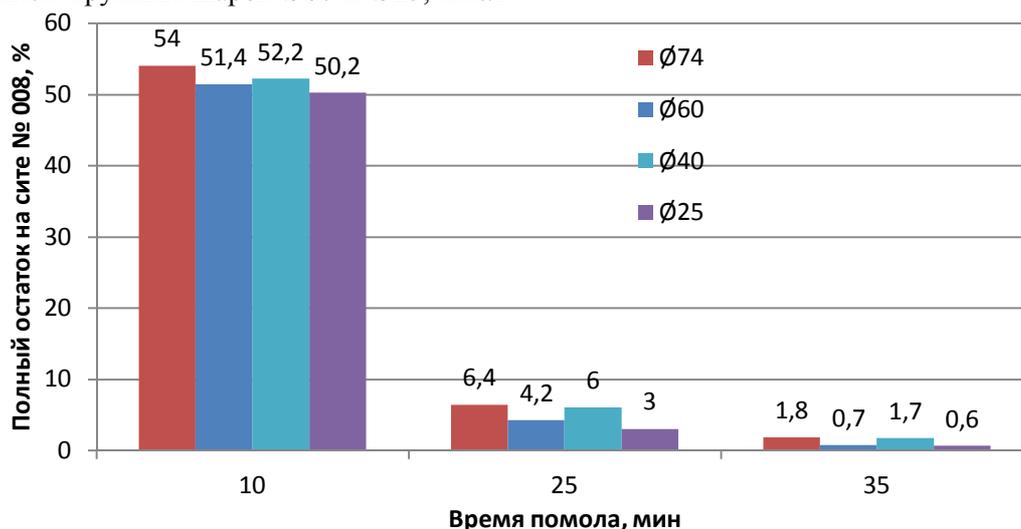


Рис. 3. Изменение полного остатка на сите № 008 в течение процесса измельчения

Добавление к мелким шарам во вторую камеру крупных шаров диаметром 60 мм привело к увеличению на 8 % величины конечной удельной поверхности клинкера и соответственно снижению на 60 % полного остатка на сите № 008 по сравнению с клинкером, измельченным за то же время (35 мин) во второй камере с крупными шарами размером 74 мм. Замена  $\text{Ø}60$  на  $\text{Ø}25$  сопровождалась изменением выше указанных дисперсных характеристик на ту же величину.

По степени интенсифицирующего воздействия на процесс измельчения крупные шары размером 74 и 40 мм идентичны друг другу на протяжении всего процесса измельчения, т.к. в первом случае на 25 мин помола удельная поверхность имела значение  $314 \text{ м}^2/\text{кг}$ , а суммарный остаток на сите № 008 6,4 %, во втором случае –  $S_{\text{уд}} = 326 \text{ м}^2/\text{кг}$ ,  $R_{008} = 6,0 \%$ , через 10 мин измельчения указанные параметры у данных загрузок имели значения: удельная поверхность  $385 \text{ м}^2/\text{кг}$  и суммарный остаток на сите № 008 1,8 % ( $\text{Ø}74$ ) и  $S_{\text{уд}} = 384 \text{ м}^2/\text{кг}$ ,  $R_{008} = 1,7 \%$  ( $\text{Ø}40$ ).

В ходе проведения работы был установлен тот факт, что диаметр крупного шара не влияет на производительность лабораторной шаровой мельницы открытого цикла, свидетельством

дисперсные характеристики несколько выше по сравнению с материалом, измельченным при использовании двух других загрузок (рис. 2 и 3), поэтому шары указанных диаметров целесообразно добавлять к мелким шарам для получения специальных видов цемента, таких как высокопрочный и быстротвердеющий. Но вместе с тем четыре выше упомянутых диаметра крупного шара рационально добавлять к мелким, для получения рядового цемента, без снижения производительности мельницы.

этого является постоянная производительность  $9,6 \text{ кг/ч}$ , значение которой не менялось при проведении опытов с различными по размеру крупными шарами.

Наличие во второй камере крупных шаров наряду с мелкими, позволило получить за 25 мин помола в лабораторной мельнице измельченный клинкер, характеризующийся величиной удельной поверхности  $300\text{--}350 \text{ м}^2/\text{кг}$  и остатком на сите №008 до 6 %, что соответствует требованиям ГОСТ 31108 – 2016 [10]. При этом наиболее тонкая степень помола достигалась в тех случаях, когда во второй камере находились шары диаметром 25 мм ( $R_{008} = 3 \%$ ) или 40 мм ( $R_{008} = 4,2 \%$ ). Увеличение длительности помола на 10 мин приводило к увеличению удельной поверхности до  $380\text{--}420 \text{ м}^2/\text{кг}$  и снижению полного остатка на сите до 2 %.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. SEMBUREAU – цементные и энергетические рынки в Европе и мире // Цемент и его применение. 2017. №3. С. 22–31.
2. Василик Г.Ю., Еремина Е.М. Цементная промышленность России в 2016 году // Цемент и его применение. 2016. №6. С. 24–33.
3. Стронин А.А. Измельчение

портландцементного клинкера в шаровой мельнице при использовании плотной шаровой упаковки и интенсификатора помола // Молодежь и научно-технический прогресс: сб. докл. X Междунар. науч.-практ. конф. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2017. С. 208–211.

4. Паяккала П. Перспективы строительства и потребления цемента в период до 2025 года в ЕС, России и США // Цемент и его применение. 2014. №1. С. 6–11.

5. Дворкин Л.И., Степасюк Ю.А. Особобыстротвердеющие высокопрочные бетоны // Технологии бетонов. 2016. №5. 6. С. 49–53.

6. Крыхтин Г.С., Кузнецов Л.Н. Интенсификация работы мельниц. Новосибирск. Изд-во ВО «Наука». 1993. 240 с.

7. Дуда В. Цемент. М.: Стройиздат. 1981. 484 с.

8. Барбаниягрэ В.Д., Матвеев А.Ф., Смаль Д.В., Москвичев Д.С. Физико-технические основы измельчения материалов в трубных мельницах // Вестник белгородского технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №4. С.182–185.

9. Барбаниягрэ В.Д., Матвеев А.Ф., Смаль Д.В., Москвичев Д.С. Интенсификация и моделирование процессов измельчения материала в шаровых трубных мельницах применительно к промышленным агрегатам // Цемент и его применение. 2016. №2. С.94–100.

10. ГОСТ 31108–2016. Цементы общестроительные. Технические условия [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader.URL: [http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293751/429375139\\_2.pdf](http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293751/429375139_2.pdf) (дата обращения: 10.04.18)

#### Информация об авторах

**Барбаниягрэ Владимир Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии цемента и композиционных материалов.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Стронин Александр Анатольевич**, магистрант кафедры технологи цемента и композиционных материалов.

E-mail: [aleksandr.stronin@rambler.ru](mailto:aleksandr.stronin@rambler.ru).

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

*Поступила в марте 2018 г.*

© Барбаниягрэ В.Д., Стронин А.А., 2018

### V.D. Barbanyagre, A.A. Stronin INVESTIGATION OF THE LARGE BALL DIAMETER INFLUENCE IN THE GRINDING MEDIA OF THE OPEN CYCLE MILL ON DISPERSE CHARACTERISTICS OF CLINKER

*At many operating cement plants in the Russian Federation, a ball mill with a low efficiency of up to 3.5 % is used for grinding cement. Most of the energy supplied to the mill is converted into warm, friction, sound and vibration, and a relatively small part of it is used directly for grinding the material, i.e. accumulates in a spherical charge in the form of potential energy. The process of grinding itself is complicated in such a grinding unit because of the presence of such negative phenomena as aggregation of material, its adherence to grinding balls and hunch plate grinding mill. Such phenomena are most strongly manifested in the fine grinding section, which corresponds to the second chamber for most cement mills that are efficient today. Due to the above reasons, the specific electricity consumption is greatly increased, which is spent for grinding, and the productivity of the cement mill is significantly reduced. For this reason, the bottleneck of cement production technology of any brand is the grinding shop. There are many ways to ensure the intensification of the process fine grinding in a mill. One of these methods is the rational selection of grinding media, which allows more complete use of the useful power of the mill directly for grinding the grinded material. The optimum composition of the grinding charge, especially in the fine grinding chamber, due to the increase in the degree of abrasive action on the grinded material, will allow reducing the specific energy consumption, and thereby increasing the productivity of the grinding unit. Authors of this article have investigated influence of diameter of a large sphere in the loading corresponding to the second camera of a mill on disperse characteristics of the grinding clinker. The specific surface and size of the full rest on a sieve No. 008 have acted as the parameters characterizing a material grinding subtlety.*

**Keywords:** disperse characteristics of clinker, grinding of clinker, ball mill, assortment of grinding bodies, fineness of grinding, open cycle.

## REFERENCES

1. CEMBUREAU – cement and energy markets in Europe and the world. Cement and its application, 2017, no. 3, pp. 22–31.
2. Vasilik G.Yu., Yeremina E.M. The cement industry of Russia in 2016. Cement and its application, 2016, no. 6, pp. 24–33.
3. Stronin A.A. The grinding of portlandcement clinker in a ball with dense spherical packing and grinding intensifier. Youth and scientific and technical progress: collection of reports of the X internationally scientific and practical conference. Belgorod, BSTU named after V.G. Shukhov Publ, 2017, pp. 208–211.
4. Payakkala P. The prospects of construction and consumption of cement during the period till 2025 in the EU, Rossi and the USA. Cement and its application, 2014, no. 1, pp. 6–11.
5. Dvorkin L.I., Stepasyuk Yu.A. Ultrahigh early-strength high quality concrete. Concrete Technology, 2016, no. 5, pp. 49–53.
6. Krykhtin G.S., Kuznetsov L.N. Intensifikation of work of mills. Novosibirsk, «Science» Publ, 1993, pp. 240.
7. Duda V. Cement. Moscow, Stroyizdat Publ, 1981, pp. 484.
8. Barbanyagre V.D., Matveev A.F, Smal D.V., Moskvichev D.S. Physical and technical basis of grinding materials in tube mills. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2016, no. 4, pp. 182–185.
9. Barbanyagre V.D., Matveev A.F, Smal D.V., Moskvichev D.S. Intensification and modeling of processes of material grinding in ball tube mills with reference to industrial aggregates. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2016, no. 2, pp. 94–100.
10. ГОСТ 31108–2016. All-construction cements. Technical specifications. Technical specifications [Electronic resource]. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293751/4293751392.pdf> (date of the application 10.04.18).

*Information about the author*

**Vladimir D. Barbanyagre**, PhD, Professor.  
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.  
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Alexandr A. Stronin** Graduate student.  
E-mail: [aleksandr.stronin@rambler.ru](mailto:aleksandr.stronin@rambler.ru).  
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.  
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received in March 2018*