

# ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В ШАРОВЫХ ТРУБНЫХ МЕЛЬНИЦАХ

---

*doc\_cdv@mail.ru*

**Барбанягрэ В.Д., д-р техн. наук, проф.,**

**Матвеев А.Ф., канд. техн. наук, проф.,**

**Смаль Д.В., канд. техн. наук, доц.,**

**Москвичев Д.С., науч. сотр.**

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

**Аннотация.** Тематика данного направления исследований относится к цементной, горноперерабатывающей, металлургической, химической, строительной и другим отраслям, связанным с измельчением минерального сырья. Работа заключается в изучении и интенсификации процессов «мокрого» и «сухого» способов измельчения в шаровых трубных мельницах, песка, шлака, цементного клинкера и т.д. за счет уменьшения пустот в шаровой упаковке. Увеличение плотности шаровой загрузки приводит к значительному увеличению её энерговооруженности, т.е. отношению массы мелющих тел к массе измельчаемого материала. Так, энерговооруженность упаковки увеличивается по сравнению с обычной в 2-2,5 раза. Использование плотной упаковки шаров позволяет увеличить производительность трубной мельницы до 30%.

Проведение научных разработок в данном направлении позволит повысить энергосбережение, тем самым снизить затраты на производство строительных материалов, там где в технологическом процессе задействованы шаровые трубные мельницы.

**Ключевые слова:** измельчение, размалываемость, плотная шаровая загрузка, шаровая трубная мельница, упаковка шаров, бронефутеровка.

Технология цемента, по существу, является парадоксальным процессом, т.к. в ней конечная цель – синтез, прочного, монолитного цементного камня осуществляется в результате предварительного двукратного тонкого измельчения твердых исходных компонентов и промежуточного продукта-клинкера в малоэффективных трубных мельницах с высоким удельным расходом топлива и электроэнергии.

Эффективность предложенных до настоящего времени технических решений не превышает 10-15 %, что объясняется, прежде всего, отсутствием новых, доступных и малозатратных подходов и кардинальных

решений в технологии тонкодисперсного измельчения. В частности, нет понимания механизма воздействия совокупности мелющих тел на размалываемый материал. В связи с указанным, повышение эффективности этого основного агрегата тонкого помола является весьма актуальной задачей.

В предлагаемом проекте предложен новый подход к процессам измельчения, согласно которому элементарный акт одновременного воздействия шаров на размалываемый материал [1, 3] в трубной мельнице осуществляется в виде импульса ударного сжатия (ИУС), который количественно выражается соотношением:  $\text{ИУС} = \frac{m_{\text{м.т.}}}{m_{\text{орм.}}} = \frac{\gamma_{\text{м.т.}} \cdot V_{\text{м.т.}}}{\rho_{\text{орм.}} \cdot V_{\text{орм.}}}$   $\left[ \frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right]$ , где:

$m_{\text{м.т.}}$  - масса мелющих тел, кг;

$m_{\text{орм.}}$  - масса одновременно размалываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;

$\gamma_{\text{м.т.}}$  - плотность мелющих тел, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{орм.}}$  - насыпная масса размалываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;

$V_{\text{м.т.}}, V_{\text{орм.}}$  - доля общего объема загрузки, занимаемая мелющими телами и размалываемым материалом соответственно.

Применительно к 1 м<sup>3</sup> шаровой загрузки 1-ой камеры мельницы:

$$\text{ИУС}_{\text{ст}} = \frac{7860 \cdot 0,59}{1550 \cdot 0,41} = \frac{4637}{635} = 7,3 \left[ \frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right] - \text{стандартная шаровая загрузка};$$

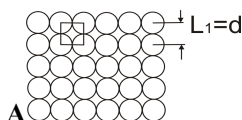
Таким образом, ИУС шаровой загрузки промышленных мельниц составляет 7~кг мелющих тел на один кг размалываемого материала. Такова энергетика этого агрегата. Анализ соотношения показывает, что реальный способ усиление импульса сжатия – это уменьшение знаменателя, т.е. количества одновременно размалываемого материала, занимающего объем пустот в шаровой загрузке и осуществление его более плотной упаковкой шаров.

Представленные в табл. 1 результаты показывают принципиальную возможность повышения степени измельчения цемента путем повышения величины ИУС шаровой загрузки, что потребовало реализации принципа плотной укладки шаров.

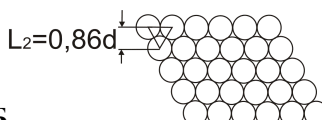
Таблица 1 – Зависимость удельной поверхности от отношения массы мелющих тел ( $m_{\text{м.т.}}$ ) к массе размалываемого материала ( $m_{\text{м}}$ )

Измеряемая величина	Размерность	Отношение ( $m_{\text{м.т.}} / m_{\text{м}}$ )		
		23,6	33	78,6
Удельная поверхность	м <sup>2</sup> /кг	320	415	560

Рис. 1-Б демонстрирует принцип плотной укладки шаров одного размера: путем смещения соседних рядов на один радиус шара, так что соединенные центры трех соседних шаров образуют равносторонний треугольник, высота которого и составляет расстояние между рядами. Объем шаров в такой упаковке составляет 74%, пустот – 26%, что в 1,85 раз меньше, чем в рыхлой упаковке. Рис. 1-А однако шаровая загрузка трубных мельниц с долей пустот, равной 0,41-0,42, далека от плотной и находится ближе к рыхлой упаковке.



Объем шаров-52%  
 Объем пустот-48%  
 А - максимально  
 рыхлая упаковка



Объем шаров-74%  
 Объем пустот-26%  
 Б - плотнейшая упаковка

Рисунок 1 – Упаковка шаров одного диаметра

Для формирования плотной загрузки предлагается двухшаровая упаковка из основного и более мелкого, вписанного в пустоты между основными шарами. Возможные варианты двухшаровых плотных упаковок приведены в табл. 2, для которых импульс ударного сжатия в 2 раза выше, чем у стандартной заводской загрузки.

Таблица 2 – Двухшаровые плотные упаковки

Виды шаров	Варианты пар шаров плотной упаковки				
	1	2	3	4	5
Диаметр основного шара (d), мм	100	80	70	50	40
Диаметр вписанного в пустоту шара, мм	70 <sup>1</sup> ; 40 <sup>2</sup> ; 20 <sup>3</sup>	60 <sup>1</sup> ; 33 <sup>2</sup>	50 <sup>1</sup> ; 30 <sup>2</sup>	40 <sup>1</sup> ; 20 <sup>2</sup>	30 <sup>1</sup> ; 17 <sup>2</sup>

- 1-кубическая пустота (образуется восьмью соседними шарами);
- 2-октаэдрическая пустота (образуется шестью соседними шарами);
- 3-тетраэдрическая пустота (образуется четырьмя соседними шарами).

$$\text{ИУС}_{\text{пл}} = \frac{7860 \cdot 0,74}{1550 \cdot 0,26} = \frac{5816}{403} = 14,43 \left[ \frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right],$$

Эффективность загрузки мелющих тел на основе плотной упаковки шаров апробирована в лабораторных условиях на двухкамерной мельнице ГИПРОЦЕМЕНТа 0,5×0,56 м при стандартной величине мелющей загрузки 55 кг.

Проведены помолы 6 кг клинкера при стандартной загрузке (Ø70 мм – 11 кг; Ø60 мм – 11 кг; Ø50 мм – 16 кг; Ø40 мм – 17 кг) средневзвешенный шар 53 мм и при двухшаровой плотной упаковке (Ø40 мм – 38 кг; Ø17 мм – 17 кг) средневзвешенный шар 33 мм.

Сравнение двух рассматриваемых режимов помола клинкера показывает, что плотная упаковка шаров размалывает клинкер значительно эффективнее, чем стандартная загрузка: при одинаковой конечной степени измельчения ( $R_{008}=8-10\%$ ;  $S=320-330 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) продолжительность помола составляет 25 и 40 мин соответственно; различие достигает 37%. Аналогичный помол 10 кг клинкера показал еще более высокую эффективность плотной упаковки шаров: время помола до 10% остатка на сите 008 при этом составило на стандартной загрузке 50 мин; на плотной упаковке – 30 мин ( $\Delta\tau=40\%$ ).

Полученные результаты позволили оценить размалываемость клинкера и производительность мельницы.

Размалываемость характеризуется удельной производительностью [b]  $\left[\frac{\text{Т/ч}}{\text{кВт}}\right]$  или индексом измельчаемости  $\mathcal{E}_{\text{инд}}$   $\left[\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{Т}}\right]$  [2,3];

Удельная производительность по методике ГИПРОЦЕМЕНТа равна:  $b = \frac{1,28 \cdot \gamma_{\text{н.кл}}}{t_{10}}; \mathcal{E}_{\text{инд}} = \frac{0,77 \cdot t_{10}}{\gamma_{\text{н.кл}}}$ ;

где  $\gamma_{\text{н.кл}}$  - насыпная масса клинкера ( $\text{т}/\text{м}^3$ );  $t_{10}$  – время помола до достижения 10%-го остатка на сите 008 (мин);

Помол фракции клинкера (5-2,5 мм) в количестве 10 кг показал следующие результаты:

$$b_{\text{ст.}} = \frac{1,28 \cdot 1,55}{50} = 0,04 \frac{\text{Т/ч}}{\text{кВт}}; \mathcal{E}_{\text{инд.}}^{\text{ст.}} = \frac{0,77 \cdot 50}{1,55} = 24,8 \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{Т}};$$

для плотной шаровой загрузки:

$$b_{\text{пл.}} = \frac{1,28 \cdot 1,55}{30} = 0,066 \frac{\text{Т/ч}}{\text{кВт}}; \mathcal{E}_{\text{инд.}}^{\text{пл.}} = \frac{0,77 \cdot 30}{1,55} = 14,9 \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{Т}}.$$

Размалываемость клинкера при плотной загрузке шаров в 1,66 раз выше, чем при стандартной загрузке:

$$\frac{b_{\text{пл.}}}{b_{\text{ст.}}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{инд.}}^{\text{пл.}}}{\mathcal{E}_{\text{инд.}}^{\text{ст.}}} = \frac{0,066}{0,040} = \frac{24,8}{14,9} = 1,66.$$

Полученные величины размалываемости клинкера позволяют рассчитать производительность заводской мельницы.

Производительность мельницы 3,2×15 м на стандартной шаровой загрузке:

$$G = \frac{12,5 \cdot D^{2,5} \cdot L \cdot \Psi \cdot \varphi \cdot (0,9 - \varphi) \cdot \gamma_{м.т.}}{7,6 \cdot \mathcal{E}_{инд.} \cdot (d_{80Г}^{-0,5} - d_{80Н}^{-0,5}) \cdot K_{\phi} \cdot K_{кр} \cdot K_c \cdot K_D}, \text{ т/ч};$$

G – производительность мельницы, т/ч; D – диаметр мельницы, м; L – длина мельницы, м; Ψ – относительная скорость вращения мельницы, Ψ=0,0236·n<sub>p</sub>·42,3<sup>0,5</sup>; n – число оборотов мельницы, об/мин; φ – степень заполнения мельницы мелющими телами; γ<sub>м.т.</sub> – средневзвешенная насыпная плотность мелющих тел (т/м<sup>3</sup>); Э<sub>инд.</sub> – индекс измельчаемости, кВт·ч/т; d<sub>80Н</sub>, d<sub>80Г</sub> – размер зерна 80% прохода начального и конечного продукта соответственно, мкм; K<sub>φ</sub>, K<sub>кр</sub>, K<sub>c</sub>, K<sub>D</sub> – коэффициенты, зависящие от дисперсности материала исходной крупности, схемы измельчения, диаметра мельницы.

Производительность мельницы 3,2×15 м на стандартной шаровой загрузке:

$$G_{ст.} = \frac{12,5 \cdot 11,1 \cdot 14,5 \cdot 0,7 \cdot 0,30 \cdot 0,6 \cdot 4,6}{7,6 \cdot 24,8 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{17}} - \frac{1}{\sqrt{13 \cdot 10^3}}\right) \cdot 1,08 \cdot 1,06 \cdot 1,15 \cdot 1,1} = \frac{1162,4}{21,5} = 54 \text{ т/ч};$$

производительность мельницы 3,2×15 м на плотной шаровой загрузке:

$$G_{пл.} = \frac{12,5 \cdot 11,1 \cdot 14,5 \cdot 0,7 \cdot 0,233 \cdot 0,667 \cdot 5,9}{7,6 \cdot 14,9 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{17}} - \frac{1}{\sqrt{13 \cdot 10^3}}\right) \cdot 1,08 \cdot 1,06 \cdot 1,15 \cdot 1,1} = \frac{1287}{14,74} = 87,9 \text{ т/ч}.$$

Расчеты подтверждают результаты лабораторных испытаний: при равной начальной и конечной дисперсности размалываемого клинкера производительность мельницы 3,2×15 м на плотной шаровой загрузке в 1,60 раза выше, чем на стандартной загрузке.

Общая характеристика плотной шаровой загрузки в сравнении с обычной заводской приведена в табл. 3, из которой видно, что объем плотной шаровой загрузки 1-ой камеры при одинаковой массе шаров (38 т) на 1,76 м<sup>3</sup> меньше, чем у стандартной (заводской).

Таблица 3 – Сравнительная характеристика шаровой загрузки цементной мельницы 2,4×13 м

Вид загрузки	Масса 1-го м <sup>3</sup> шаров, т/м <sup>3</sup>	Объем шаровой загрузки, м <sup>3</sup>	Объем шаров в загрузке, м <sup>3</sup>	Объем пустот в загрузке, м <sup>3</sup>
Предлагаемая плотная	5,90	6,44	4,83	1,61
Обычная заводская	4,64	8,20	4,83	3,37

Общий объем пустот в плотной загрузке в 2 раза меньше, чем у заводской и в 2 раза меньше и масса одновременно размалываемого материала. Но производительность мельницы не уменьшается, а как показали расчеты, возрастает в результате более высокой энергетики – (величина ИУС). При этом материал легче размалывается и быстрее продвигается по длине мельницы.

Промышленные испытания на мельнице 2,4×13 м, приведенные в табл. 4, свидетельствуют, что плотная упаковка в сравнении с заводской, обеспечивает более тонкий помол цемента и более высокую его гидравлическую активность.

Таблица 4 – Влияние плотности шаровой загрузки на физико-механические свойства цемента 2,4×13 м

Вид шаровой загрузки при помоле цемента	Плотность шаровой загрузки, т/м <sup>3</sup>	Тонкость помола		Предел прочности, МПа			
		Прошло через сито 008, %	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	на изгиб		на сжатие	
				в возрасте, сут.		в возрасте, сут.	
				3	7	3	7
Заводская	4,63	90,4–91,5	283–296, ср. 290	3,5	5,0	18,8	28,7
Плотнейшая экспериментальная	6,10	97,3–97,6	325 – 454 ср. 380	4,1	6,0	24,8	39,1

При равной дисперсности материала производительность мельницы выше на 25 %, что, однако значительно меньше полученных расчетом величин.

Основной причиной расхождения результатов является классификация шаров из-за сортирующей бронефутеровки во второй камере мельницы, которая разрушает плотную упаковку шаров и преимущество плотной упаковки теряется.

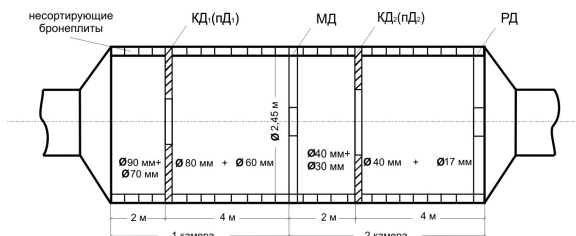


Рисунок 2 – Внутренняя оснастка мельницы 2,6×13 м

Для сохранения плотной упаковки шаров по всей длине мельницы предлагается установка в 1-ой и 2-ой камерах мельницы двух кольцевых диафрагм (КД<sub>1</sub> и КД<sub>2</sub>), назначение которых – препятствовать перемещению шаров вдоль оси мельницы и их перемешиванию. В пределах предлагаемых 4-х участков мельницы будет действовать индивидуальная пара основного и вписанного шара, согласно предлагаемым схемам на рис. 2. Кольцевые диафрагмы можно заменить на прутковые перегородки, изготовление и монтаж которых гораздо проще, а живое сечение достаточно велико, чтобы не ухудшить аспирацию мельницы.

Классификация шаров происходит не только по оси мельницы, но и по сечению: в результате различной силы трения крупные шары отрываются раньше, чем мелкие шары и располагаются ближе к оси мельницы, а мелкие шары оказываются на периферии от оси мельницы.

Предлагаемая лифтерно-желобчатая бронефутеровка, фрагмент, который приведен на рис. 3, за счет соответствия диаметров желоба и крупного шара увеличивает силу трения крупных шаров, их отрыв от корпуса мельницы происходит одновременно с мелкими шарами и классификации шаров по сечению мельницы не происходит. Желобчатая бронефутеровка в определенной степени препятствует классификации шаров и вдоль оси мельницы, так что установки кольцевых диафрагм может не потребоваться.

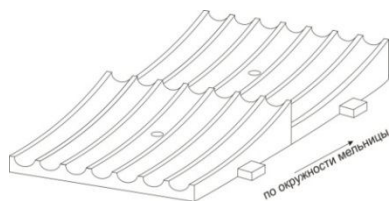


Рисунок 3 – Лифтерно-желобчатые бронеплиты

Если в представительных, достаточно длительных промышленных испытаниях при помоле в потоке, а не порционно, подтвердятся результаты лабораторных опытов, предлагаемая новация может стать альтернативой перевода мельниц с открытого цикла помола на замкнутый с существенной экономией капитальных и эксплуатационных затрат.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08029 «р\_офи\_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.*

#### Список литературы:

1. Крыхтин Г.С., Кузнецов Л.Н. Интенсификация работы мельниц. Новосибирск: Изд-во «Наука», 1993. 218 с.

2. Пироцкий В.З. Цементные мельницы // Технологическая оптимизация. Спб, 1999. С. 54-60.
3. Контроль цементного производства / Л.В. Белов, А.К. Беляев, А.М. Богин [и др.] /под ред. А. Ф. Семендяева. Ленингр.: Изд-во Стройиздат, 1974. изд. 3-е доп. и перераб. 304 с.
4. Богданов В.С. Методика расчета мощности, потребляемой мельницами с поперечно-продольным движением загрузки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2001. №1. С. 104-111.