

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЗАВОДСКИХ ШАРОВЫХ ТРУБНЫХ МЕЛЬНИЦ\*

xtsm@intbel.ru

Разработан способ моделирования процесса измельчения и определения производительности заводских шаровых трубных мельниц с использованием лабораторной мельницы Гипроцемента и применением модульных характеристик, описывающих процесс измельчения в мельницах.

**Ключевые слова:** соотношение, основные параметры, лабораторная, заводская мельница.

Многочисленные лабораторные исследования по интенсификации процессов измельчения клинкера практически не находят применения в заводских условиях, в связи с чем рассмотрена возможность моделирования процессов измельчения в заводских мельницах на основе измельчения материалов в стандартной двухкамерной лабораторной мельнице Гипроцемента ( $\emptyset 0,5 \times 0,56$  м), которой оснащены лаборатории всех цементных заводов. За основу моделирования приняты четыре показателя, названные нами модулями, которые охватывают главные аспекты процесса помола в шаровых трубных мельницах [1–6]:

1. Размерный модуль ( $M_p$ ) как отношение объемов заводской и лабораторной мельниц ( $V_{зм}/V_{лм}$ );

2. Модуль интенсивности ( $M_n$ ) как отношение числа оборотов в минуту заводской и лабораторной мельниц ( $n_{зм}/n_{лм}$ );

3. Модуль динамический ( $M_d$ ) как отношение высот падения шаров (или диаметров мельниц) в водопадном режиме заводской и лабораторной мельниц соответственно ( $n_{зм}/n_{лм}$ );

4. Модуль кинетический ( $M_k$ ) как отношение линейных скоростей отрыва шаров от поверхности барабана в верхней точке мельниц заводской и лабораторной соответственно.

Необходимо привести некоторые пояснения по формированию модулей. Модуль интенсивности определяет соотношение количества импульсов ударного сжатия (ИУС) заводской и лабораторной мельниц соответственно за одну минуту, но так как число ИУСов обоих мельниц за один оборот одинаково, то отношение ИУСов за одну минуту равно отношению числа оборотов в минуту. При формировании динамического модуля ( $M_d$ ) высоты падения шаров были приняты равными диаметрам мельниц, так как множитель  $\cos \alpha$  обоих мельниц одинаков и при вычислении модуля  $M_d$  сокращается.

Физический смысл введенного кинетического модуля ( $M_k$ ) содержит определенную до-

лю научной новизны, т.к. наличие скорости отрыва шаров от барабана мельницы под суммарным действием центробежной силы и силы тяжести и последующее движение шаров по параболе, свидетельствуют о происходящем при этом истирании материала, находящегося между поверхностью барабана мельницы и прилегающим к ней контактными слоем шаров. Этот процесс в научно-технической литературе в подобном аспекте не рассматривался.

Произведение четырех рассмотренных модулей определяет величину общего модуля ( $M_o$ ), который является коэффициентом пропорциональности между производительностью лабораторной мельницы Гипроцемента и производительностью заводских мельниц ( $G_{зм}$ ):  $G_{зм} = M_o \cdot q_{лм}$ . Удельная производительность лабораторной стандартной мельницы Гипроцемента ( $q_{лм}$ ) определяется по следующим показателям: масса загрузки шаров одной камеры 55 кг, ассортимент шаров в загрузке:

$\emptyset 73$  мм – 9 шаров  $\times 1,6$  кг = 14,4 кг;

$\emptyset 53$  мм – 8 шаров  $\times 0,61$  кг = 4,88 кг;

$\emptyset 40$  мм – 24 кг;

$\emptyset 17$  мм – 12 кг.

Размалывается фракция клинкера 10 – 0 мм, в т.ч. мелкой фракции (1-3 мм) не более 200 г. Время помола 40 минут. Тонкость помола клинкера:  $R_{02} = 0,8$  %,  $R_{008} = 7,6$  %,  $S_{уд} = 357$  м<sup>2</sup>/кг. Численная величина  $q_{лм}$  составляет:

$$q_{лм} = m_m \cdot 60 / \tau = 4 \cdot 60 / 40 = 6 \text{ кг/ч.}$$

$m_m$  – масса размолотого материала, кг;

$\tau$  – время помола, мин.

Параметры, необходимые для моделирования и полученные результаты приведены в таблице 1. Удовлетворительная сходимости значений производительности заводских мельниц, полученная предлагаемым методом моделирования, с их паспортной производительностью и средними значениями производительности, полученными длительной эксплуатацией в производственных условиях, свидетельствует о том, что использованные параметры моделирования

адекватны процессам измельчения, протекающим в шаровых трубных мельницах, а принятые при этом допущения приемлемы.

После соответствующего апробирования в заводских условиях рассмотренный метод моделирования производительности трубных мельниц может стать удобным и быстрым способом контроля и улучшения размолоспособности клинкера при обжиге и оптимизации режима помола цемента.

**Основные результаты и выводы.**

1. Для практического применения предложенных приемов интенсификации процессов измельчения разработан способ определения производительности заводских цементных мельниц по удельной производительности лабораторной стандартной мельницы Гипроцемента (Ø 0,5×0,56 м) и по общему модулю заводской мельницы (M<sub>о.з.м.</sub>), который представляется произведением четырех частных модулей:

1) Размерного модуля (M<sub>р</sub>) как отношение объемов заводской и лабораторной мельниц (V<sub>з.м.</sub>/V<sub>л.м.</sub>);

2) Модуля интенсивности (M<sub>и</sub>) как отношение числа оборотов в минуту заводской и лабораторной мельниц (n<sub>з.м.</sub>/n<sub>л.м.</sub>);

3) Модуля динамического (M<sub>д</sub>) как отношение высот падения шаров или (отношения диаметров мельниц) в водопадном режиме заводской и лабораторной мельниц соответственно (n<sub>з.м.</sub>/n<sub>л.м.</sub>);

4) Модуль кинетический (M<sub>к</sub>) как отношение линейных скоростей отрыва шаров от поверхности барабана в верхней точке барабана мельниц заводской и лабораторной соответственно.

5) Производительность заводской мельницы равна:

Таблица 1

**Параметры заводских мельниц**

Мельница, №	Наружный диаметр мельницы, d <sub>н.з.</sub> , м Длина мельницы L, м	Внутренний диаметр мельниц, d <sub>в.з.</sub> , м	Полезная длина мельницы, L <sub>пз.</sub> , м	Внутренний объем мельницы, V <sub>в.</sub> , м <sup>3</sup>	Частота вращения мельницы, n <sub>з.</sub> об/мин.	Линейная скорость меллошх тел в точке отрыва от внутр. поверхности барабана мельницы, v <sub>ср.з.</sub> , м/мин
1	2,2×13	2,05	12,7	41,9	23,2	149,34
2	2,6×13	2,45	12,9	60,8	19,5	158,0
3	3,0×14	2,85	13,8	88,0	17,6	157,5
4	3,2×15	3,05	14,8	108,0	16,94	162,2
5	4,0×13,5	3,52	13,25	151,8	16,2	179,0
6	Лаб. мел-ца	0,5	0,28*	0,055*	48	75,36

\*- для одной камеры.

Таблица 2

**Модельные отношения параметров: заводская/лабораторная мельница**

Размерный модуль: соотношение объемов M <sub>р</sub> =V <sub>з.м.</sub> /V <sub>л.м.</sub>	Модуль интенсивности. Соотношение импульсов ударного сжатия, M <sub>и</sub> =n <sub>з.м.</sub> /n <sub>л.м.</sub> обор/мин	Динамический модуль как отношение высот падения меллошх тел пропорционально диаметрам, M <sub>д</sub> =d <sub>з.</sub> /d <sub>л.</sub>	Кинетический модуль, как отношение линейных скоростей меллошх тел при отрыве от пов-ти барабана мельницы: V/V <sub>л.</sub> =d <sub>з.</sub> ·n <sub>з.</sub> /d <sub>л.</sub> ·n <sub>л.</sub>	Общий модуль: M <sub>о</sub> M <sub>о</sub> = $\frac{V_{з.м.}}{V_{л.м.}} \cdot \frac{n_{з.м.}}{n_{л.м.}} \cdot \frac{d_{з.м.}}{d_{л.м.}} \cdot \frac{n_{з.м.}}{n_{л.м.}}$	Производительность заводских цементных мельниц по данным моделирования, Q <sub>з.м.</sub> =q <sub>л.</sub> ·M <sub>о</sub> т/ч	Паспортная производительность заводских мельниц, т/ч
820	0,48	4,1	1,98	3,2·10 <sup>3</sup>	18,5	16
1105	0,40	4,9	2,0	4,33·10 <sup>3</sup>	26,0	25
1600	0,37	5,7	2,1	7,10·10 <sup>3</sup>	42,4	38
1965	0,35	6,1	2,15	9,0·10 <sup>3</sup>	54,0	49
2745	0,34	7,64	2,38	16,97·10 <sup>3</sup>	101,8	89
Удельная производительность q <sub>л.</sub> =6 кг/ч						

$$G_{\text{зм}} = M_{\text{о.зм}} \cdot q_{\text{лм}}, \text{ где: } M_{\text{о.зм}} = M_{\text{р}} \cdot M_{\text{и}} \cdot M_{\text{д}} \cdot M_{\text{к}}.$$

$q_{\text{лм}}$  – определяется экспериментально в заводской лаборатории в течение одного часа.

*\*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № НК 14-41-08029 р\_офи\_м.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крыхтин Г.С., Кузнецов Л.Н. Интенсификация работы мельниц. Новосибирск: ВО «Наука», 1993. 240 с.

2. Пирозкий В.З. Цементные мельницы: технологическая оптимизация. С.-Пб.: Изд-во Центра профессионального обновления, 1999. 145 с.

3. Андреев С.Е., Товаров В.В., Перов В.А., Закономерности измельчения и исчисления ха-

рактеристики гранулометрического состава. М.: Metallurgizdat, 1959. 437 с.

4. Бажанова О.И., Богданов В.С., Шаптала В.Г. Моделирование температуро-влажностного режима цементной мельницы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. №4. С. 91–95.

5. Севостьянов В.С., Михайличенко С.А., Ильина Т.Н., Маркидин А.А., Сиваченко Т.Л. Способы совершенствования измельчителей ударного действия на основе многостержневых рабочих органов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №4. С. 87–90.

6. Дешко Ю.И., Креймер М.Б., Крыхтин П.С. Измельчение материалов в цементной промышленности. М.: Изд-во литературы по строительству, 1966. 270 с.

---

**Barbanyagre V.D., Matveev A.F., Smal D.V., Moskvichyov D.S.**

**MODELING OF PROCESSES FOR ASSESSMENT PRODUCTIVITY OF FACTORY BALL MILL**  
*A method for simulating the grinding process and determine the performance of the factory ball tube mills using a laboratory mill Giprotsment and application of the modular characteristics, describing the process of grinding mills was developed.*

**Key words:** ratio, basic parameters, laboratory, factory mill.

---

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

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

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

E-mail: xtsm@intbel.ru.

**Матвеев Александр Фролович**, кандидат технических наук, профессор, кафедры технологии цемента и композиционных материалов.

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

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

E-mail: xtsm@intbel.ru.

**Смаль Дмитрий Викторович**, кандидат технических наук, кафедры технологии цемента и композиционных материалов.

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

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

E-mail: xtsm@intbel.ru.

**Москвичев Дмитрий Сергеевич**, научный сотрудник, кафедры технологии цемента и композиционных материалов.

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

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

E-mail: xtsm@intbel.ru.