

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ВАЛКОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ**

**Доц. ВАЙТЕХОВИЧ П. Е., ФРАНЦКЕВИЧ В. С.**

*Белорусский государственный технологический университет*

Ускорение научно-технического прогресса является одним из способов улучшения экономического состояния нашей республики. Создание энергосберегающих технологий и оборудования при одновременном снижении их металлоемкости – ключевая задача НТП. Естественно, что при ее решении внимание в первую очередь должно уделяться оборудованию, реализующему технологические процессы, наиболее энергоемкие и вносящие существенный вклад в промышленное энергопотребление в целом.

В теплоэнергетике, химической промышленности и других отраслях к таким процессам относится тонкое измельчение сыпучих материалов. В отечественной технологии механического измельчения материалов широкое распространение получили шаровые барабанные мельницы. Однако они относятся к наиболее энерго- и металлоемким агрегатам. Более экономичными являются измельчители, реализующие локализованный подвод энергии к порции размалываемого материала, например валковые среднеходные мельницы. Измельчение материала валками в отличие от измельчения свободными мелющими телами носит направленный характер и эффективнее осуществляется в слое. Общий признак измельчителей валкового типа – преобладающее принудительное самоизмельчение материала в слое, происходящее за счет раздавливания и истирания взаимодействующих между собой частиц с поверхностью измельчающих валков. Высокая эффективность измельчения материала валками в плотном слое под высоким давлением приводит не только к увеличению производительности помольной установки, но и к значительному снижению удельных энергозатрат на помол [1].

Достоинствами валковых мельниц являются сравнительно малые габариты установок, простота монтажа, высокая приспособленность к автоматизации, низкий уровень шума. Валковые мельницы характеризуются более низкими удельными энергозатратами по сравнению с шаровыми, малым износом размольных элементов, занимают меньше места на единицу мощности и требуют значительно меньших капиталовложений. Эти мельницы работают в замкнутом цикле с воздушным сепаратором, легко переоборудуются на требуемую тонкость помола и почти всегда используются в качестве помольно-сушильных комплексов с пневмотранспортом готового продукта [2].

Валковые среднеходные мельницы широко используются в мировой практике для размола до пылевидного состояния каменных углей, полуантрацитов, тощих углей и некоторых отходов обогащения в системах топливоприготовления на тепловых электрических станциях [1].

При проектировании валковых среднеходных мельниц рациональная организация процесса измельчения в них отодвигалась на второй план: их конструктивные решения и режимные параметры в гораздо большей степени подчинялись требованиям общего машиностроения, чем условиям оптимальности собственно процесса. В результате сложилось противоречие между наличием значительного числа прогрессивных конструкторских решений для валковой мельницы как машины и отставанием моделирования и оптимизации в ней самого рабочего процесса. В связи с этим исследование, моделирование и оптимизация рабочего процесса измельчения в среднеходных валковых мельницах является актуальной задачей.

Повышение качества помола возможно только при оптимизации конструктивных и технологических параметров мельницы. Одной из основных частей оптимизации является математическое моделирование. В связи с этим нами была разработана математическая модель движения одиночной частицы материала по вращающейся тарелке мельницы [3]. Используя полученную модель и исходя из условия гарантированного попадания частицы под валок, можно определить оптимальное количество валков и оптимальный диапазон частот вращения размольной тарелки. С помощью этой модели определяются также величина и направление полной скорости частицы на выходе с тарелки. Дальнейшим шагом было создание математической модели движения частицы материала в кольцевом зазоре мельницы. Одновременно были проведены исследования по изучению поведения воздушного потока внутри помольной установки. С помощью трехканального зонда замерялись профили скоростей в трех сечениях и строились соответствующие зависимости. Реальные значения скоростей газа использовались при расчете траектории движения частицы для различного расхода газа [4].

Следующим этапом моделирования является определение оптимальной эффективности классификации для обеспечения максимальной степени измельчения при заданных размерах исходного материала и готового продукта. Для этого рассмотрим работу мельницы в замкнутом цикле (рис. 1). При таком режиме измельченный материал поступает на классификацию, где делится на готовый мелкий продукт и крупный продукт (циркулирующая нагрузка), возвращаемый в мельницу на доизмельчение. Нагрузка непрерывно циркулирует из классификатора в мельницу и обратно и выходит из цикла только после измельчения до требуемой крупности. Использование такой схемы работы мельницы позволяет повысить производительность без дополнительных затрат энергии. Это объясняется тем, что при работе в замкнутом цикле уменьшается переизмельчение материала, готовый продукт, оставаясь кондиционным по размеру максимального предельного зерна, в среднем получается крупнее, средний диаметр его увеличивается, а удельная поверхность уменьшается [5].

В мельницу подаются количество материала, равное  $Q$ , и циркулирующая нагрузка  $QC_2$ . Из схемы работы в замкнутом цикле видно, что доля циркулирующей нагрузки  $C_2$  равна отношению ее массы к массе исходного материала. Соответственно в мельницу поступает двухфракционный материал  $C_0d_0$  и  $C_2d_2$  со средними диаметрами фракций  $d_0$  и  $d_2$ , где  $d_0$  – средний размер исходного материала;  $d_2$  – то же циркулирующей нагрузки. После

классификации получаем готовый продукт и крупный, причем в первом присутствует некая доля второго, соответствующая эффективности классификации.

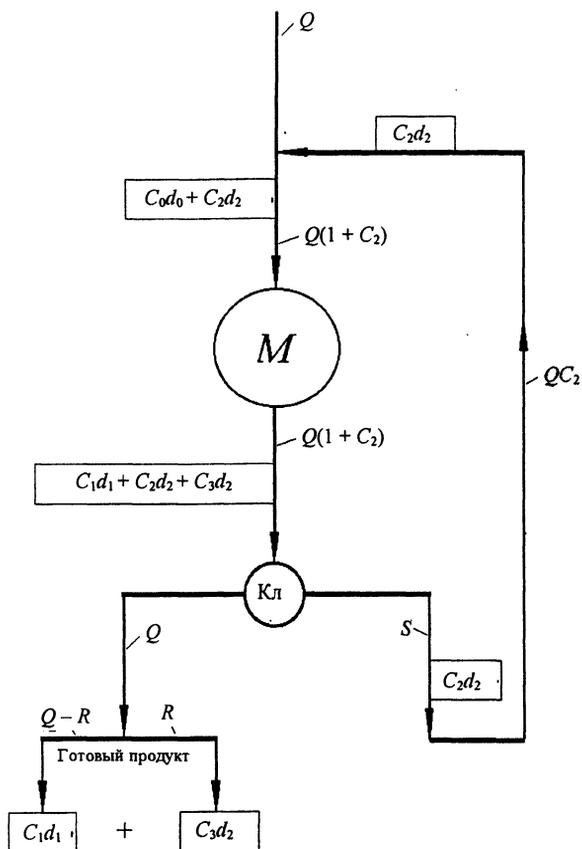


Рис. 1. Схема замкнутого цикла измельчения

Исходя из схемы помола (рис. 1) и приняв долю вновь подаваемого материала за единицу  $C_0 = 1$ , определим доли основных фракций на всех стадиях процесса:

$$C_2 = \frac{S}{Q}; \quad C_3 = \frac{R}{Q}; \quad C_1 = \frac{Q-R}{R}; \quad C_1 + C_3 = C_0 = 1, \quad (1)$$

где  $Q$  – масса подаваемого материала;  $S$  – масса циркулирующей нагрузки;  $R$  – масса крупного материала, попавшего в готовый продукт;  $C_0, C_1, C_2, C_3$  – доли соответствующих фракций к исходному материалу.

Эффективность классификации в этом случае будет равна

$$E = \frac{C_2}{C_2 + C_3}. \quad (2)$$

Как известно, степень измельчения – это отношение средневзвешенного размера зерен исходного материала перед измельчением к размеру зерен измельченного продукта. При замкнутом цикле работы мельницы (рис. 1) степень измельчения равна

$$i = \frac{C_0 d_0 + C_2 d_2}{C_1 d_1 + C_2 d_2 + C_3 d_2} \quad (3)$$

По формуле (2), выражая  $C_1$  и  $C_2$  через эффективность  $E$  и учитывая, что  $C_0 = 1$ , получили степень измельчения как функцию нескольких переменных в явном виде

$$i = \frac{(1 - E)d_0 + EC_3 d_2}{(1 - C_3)(1 - E)d_1 + (1 + E)C_3 d_2} \quad (4)$$

Из данной математической зависимости можно определить оптимальную эффективность классификации  $E_{\text{опт}}$  и размер зерен циркулирующей нагрузки  $d_2$  для обеспечения максимальной степени измельчения  $i_{\text{max}}$ .

Анализируя разные методы оптимизации [6, 7], пришли к выводу, что задачу такого рода предпочтительнее решать методом Хука – Дживса. В качестве целевой функции выбиралась степень измельчения, а ограничения задавались по оптимальной эффективности и среднему размеру циркулирующей фракции, причем диапазоны изменения этих параметров принимались:  $0 < E_{\text{опт}} < 1$ ;  $d_1 < d_2 < d_0$ . В качестве начальных условий задавались размеры зерен исходного материала  $d_0$  и готового продукта  $d_1$ . Кроме того, задавалась доля крупной фракции  $C_3$  в готовом продукте. Этот параметр как остаток на сите является одним из основных при определении качества помола. Расчеты проводились на ЭВМ. Размер исходного материала изменялся от 5 до 15 мм, размер готового продукта – в диапазоне 50...300 мкм, а  $C_3$  принималась 10 %.

Результаты некоторых частных случаев расчета представлены на рис. 2 и 3. Из них видно, что с уменьшением степени измельчения эффективность классификации повышается. Это объясняется тем, что при уменьшении  $i$  происходят ухудшение качества помола и возрастание в связи с этим доли циркулирующей нагрузки  $C_2$ , т. е. появляется большее количество крупных частиц, а, как известно, крупные частицы проще уловить сепаратором, поэтому и увеличивается эффективность классификации.

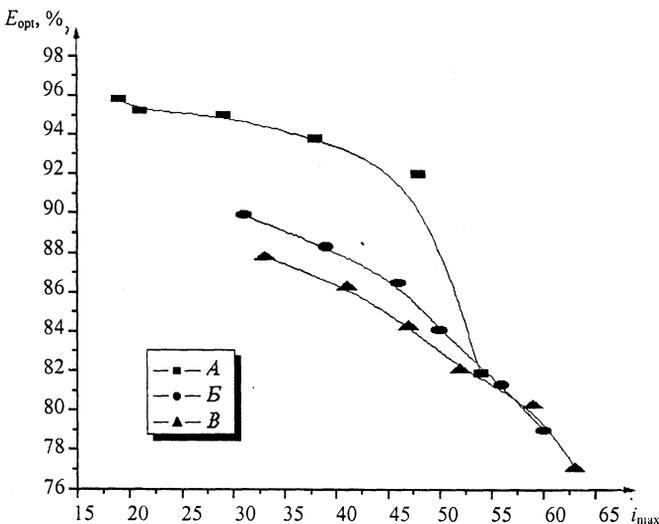


Рис. 2. Зависимость эффективности классификации от максимальной степени измельчения (исходный размер материала  $d_0$ : А – 5 мм; Б – 10; В – 15 мм)

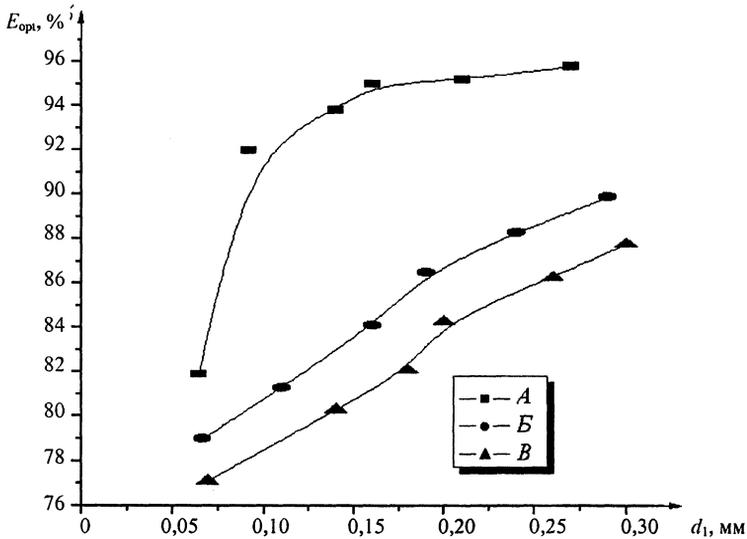


Рис. 3. Зависимость эффективности классификации от получаемого размера готового продукта (исходный размер материала \$d\_0\$: A – 5 мм; B – 10; B – 15 мм)

Разработанная схема помола в замкнутом цикле и метод оптимизации позволяют определить максимальную степень измельчения при любом конкретном значении каждого из пяти параметров, входящих в (4).

Однако степень измельчения – это качественный показатель, и он не достаточен для проведения полного анализа работы мельницы. Необходим учет количественных показателей, главным из которых является производительность мельницы.

Для расчета производительности среднеходной валковой мельницы используется зависимость [8]

$$Q = \frac{1}{k_{ц}} v_b L_b h \rho z, \quad (5)$$

где \$k\_{ц}\$ – кратность циркуляции; \$v\_b\$ – окружная скорость вала, м/с; \$L\_b\$ – ширина вала, м; \$h\$ – толщина слоя материала под валком, м; \$\rho\$ – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>; \$z\$ – число валков.

Как видно из (5), производительность прямо пропорциональна геометрическим и технологическим параметрам мельницы и обратно пропорциональна кратности циркуляции. Технологические и геометрические параметры рассчитываются по известным методикам [8], а кратность циркуляции обычно принимается в диапазоне 10...15. До сих пор нет методик для расчета и оптимизации этого параметра, что вполне объяснимо сложностью протекающих в мельнице процессов.

Кратность циркуляции можно определить исходя из общего количества циклов воздействия на материал до его полного разрушения. Это количество циклов \$n\$ определяется по формуле [9]

$$n = \frac{3 \lg(i)}{\lg(a)}, \quad (6)$$

где \$i\$ – степень измельчения; \$a\$ – объемная степень измельчения при однократном воздействии.

В свою очередь, для среднеходной валковой мельницы общее количество циклов равно

$$n = k_u n_b, \quad (7)$$

где  $n_b$  – количество циклов воздействия валка на материал за один проход его по тарелке мельницы.

Тогда формула для производительности примет вид

$$Q = \frac{n_b \lg(a)}{3 \lg(i)} v_b L_b h \rho z. \quad (8)$$

С точки зрения оптимизации, по разработанной схеме (рис. 1), все параметры, кроме кратности циркуляции, можно считать постоянными величинами. Обозначим их параметром  $Z$ , и окончательно формула для производительности примет вид

$$Q = \frac{n_b \lg(a)}{3 \lg(i)} Z. \quad (9)$$

Итак, мы получили искомую функцию  $Q$  в явном виде в зависимости от трех переменных. Эта задача оптимизации также может быть решена с помощью метода Хука – Дживса. В качестве целевой функции принимаем производительность, а ограничивающими параметрами – количество циклов валка  $n_b$ , объемную степень измельчения  $a$  и традиционную степень измельчения  $i$ . Величину последнего параметра можно принимать как  $i_{\max}$ , полученную в ходе предыдущего решения.

Апробация предложенного метода проведена для оптимизации параметров лабораторной валковой мельницы. Результаты по оптимизации имеют хорошую сходимость с экспериментальными данными.

Таким образом, разработанная схема помола в замкнутом цикле наиболее объективно отражает влияние всех факторов на этот процесс. Методика оптимизации и ее апробация показали, что с достаточно высокой точностью можно рассчитать максимальную степень измельчения и производительность при оптимальных значениях всех основных параметров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Летин Л. А., Роддатис К. Ф. Среднеходные и тихоходные мельницы. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360 с.
2. Дуда В. Цемент. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
3. Францкевич В. С., Вайтехович П. Е. Оптимизация движения материала по размольной тарелке среднеходной мельницы // Труды БГТУ. Сер. III – 2001. – Вып. IX. – С. 109–113.
4. Францкевич В. С., Гарабажиу А. А. Движение одиночной частицы измельчаемого материала в кольцевом зазоре среднеходной мельницы // Труды БГТУ. Сер. химии и технологии неорганич. в-в. – 2002. – Вып. X. – С. 229–233.
5. Андреев С. Е., Перов В. А., Зверевич В. В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1980. – 415 с.
6. Бояринов А. И., Кафаров В. В. Методы оптимизации в химической промышленности. – М.: Химия, 1975. – 576 с.
7. Банди Б. Методы оптимизации: Вводный курс. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.
8. Сапожников М. Я. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. – М.: Высш. шк., 1971. – 382 с.
9. Сиденко П. М. Измельчение в химической промышленности. – М.: Химия, 1977. – 368 с.