

Ковалюх С. В., директор НПП «КВАР»,  
Ковалюх В. Р., доц.,  
Журавлев Ю. В., проф.

Харьковский государственный технологический университет строительства и архитектуры

## УНИВЕРСАЛЬНАЯ ТРУБНО-КОНУСНАЯ МЕЛЬНИЦА С РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

v.s\_bogdanov@mail.ru

На основании анализа классических барабанных и трубных шаровых мельниц с жесткой структурой, биконических и ступенчатых мельниц с жестко-переменной структурой, а также мельниц с регулируемым электроприводом предлагается современная концепция измельчения, с новой системой взглядов на механизм и технологию процесса измельчения. На ее основе разработана универсальная трубно-конусная мельница плавно-переменной (интегральной) структуры нового поколения с регулируемым электроприводом.

**Ключевые слова:** шаровая мельница, регулируемый привод, мелющее тело, производительность.

Шаровая мельница (ШМ) является консервативным измельчительным агрегатом, который за более чем вековую историю (первый патент ШМ выдан в Германии в 1881 г.) практически не претерпел радикальных изменений. Это свидетельствует как о неоспоримых достоинствах и незаменимости ШМ во многих базовых отраслях промышленности, так и целой гаммой труднопреодолимых недостатков. Проблема измельчения традиционно реализовывалась не с позиций системного подхода, а увязка в отдельных частных решениях: секционирование мельниц по камерам; классификация шаров; выбор коэффициента заполнения и сортамента шаров; выбор профиля бронифутеровки в каждой камере; выбор цикла, технологической схемы, стадий измельчения и т. д.

Генезис всех недостатков – в жесткой структуре ШМ.

Именно жесткая структура не позволяет активно влиять на параметры процесса измельчения. Переход от жесткой к плавно-переменной (интегральной) структуре ШМ позволяет радикально решить проблему измельчения.

На измельчение оказывает влияние множество факторов, однако, обобщенно эффективность работы ШМ оценивают ее производительностью, приведенной к энергозатратам. Рассмотрим некоторые известные эмпирические формулы производительности для трех типов мельниц.

Процесс измельчения в ШМ подчиняется одним и тем же законам, но каждая из отраслей промышленности имеет свою специфику, которая в формулах производительности должна отражаться различными коэффициентами, но не ее структурой.

Таблица 1

### Расчетные соотношения производительности для мельниц различных типов

Горнорудные (1)	Углеразмольные (2)	Цементные (3)
$Q = kD^{2.5}L$	$B = kD^{2.4}n^{0.8}\varphi^{0.6}L$	$Q = kV\sqrt{D}\sqrt{\frac{G}{V}}$

где:  $B, Q$  - производительность мельницы, т/ч;  $k$  - постоянный коэффициент;  $V$  - рабочий объем мельницы, м<sup>3</sup>;  $D$  - внутренний диаметр, м;  $L$  - длина мельницы, м;  $G$  - масса шаров, т;  $\varphi$  - коэффициент заполнения мелющих тел;  $n$  - частота вращения мельницы, об/мин.

Сопоставление выражений (1)-(3) позволяет сделать следующие выводы:

- обобщенно производительность мельницы в основном зависит от рабочего объема, поскольку все остальные параметры практически постоянны и по своим величинам малозначимы;

- из (1) и (2) видно, что важен не просто рабочий объем мельницы, а соотношение  $L/D$  в этом объеме;

- только в выражении (2) отмечено незначительное влияние на процесс измельчения частоты вращения мельницы, а в (1) и (3) этот параметр вообще отсутствуют, при этом параметр  $n^{0.8}$  при постоянной частоте вращения классических мельниц является не более чем постоянным коэффициентом  $k$ ;

- в (2) и (3) отмечено незначительное влияние шаровой загрузки, а в (1) этот параметр вообще не учитывается.

Таким образом, во всех отраслях промышленности не учтен феномен влияния частоты вращения мельницы и шаровой загрузки, которые являются важнейшими параметрами процесса измельчения при заданном соотношении  $L/D$ , а сами формулы, приведенные в табл.1, в полной мере не отражают процесса измельчения.

### ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ $L/D$ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Из формул (1) и (2) следует, что производительность в большей степени зависит от внутреннего диаметра мельницы  $D$ , чем от её длины  $L$ , при этом не оговариваются важнейшее усло-

вие - границы достоверности и применимости этих параметров. То есть, вопреки инженерному смыслу, утверждается, что максимальную производительность можно обеспечить при  $D \rightarrow \infty$ , а  $L \rightarrow 0$ .

Поскольку процесс измельчения весьма специфичен, рассмотрим известные практические прецеденты в различных отраслях промышленности. Обратимся к опыту работы угольных шаровых барабанных мельниц (ШБМ) [1,2,3], цемент-

ных трубных мельниц [4] и сопоставим полученные результаты (табл.2).

Исследования ШБМ 400/800 (Ш-50) показали ее неэффективность, и только вопреки формулам (2,3), перераспределив  $L/D$  [3] была принята в эксплуатацию базовая в энергетике СНГ мельница ШБМ-370/850 (Ш-50А). Это позволило снизить удельный расход электроэнергии на 9,2 %.

Соотношение  $L/D$  в Ш-50А было бы выбрано ещё большим, если бы не ограничение по длине мельниц

Таблица 2

Технические характеристики мельниц замкнутого цикла измельчения

Параметр	Угольные ШБМ		Цементные шаровые мельницы замкнутого цикла измельчения	
	Ш-50	Ш-50А		
Размеры, м	4,0 / 8,0	3,7 / 8,5	3,95 / 6,4	3,65 / 10,3
Рабочий объем, м <sup>3</sup>	100,0	91,5	100,0	104,0
Отношение $L/D$	2,0	2,3	1,62	2,82
Шаровое заполнение, т	100	105	123,0	141,0
Коэффициент заполнения шаров	0,22	0,25	0,27	0,3
Производительность, т/ч	50,0	50,0	43,0	45,0
Мощность, кВт	2460	2000	1490,0	1862,0
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т	49,2	40,0	34,7	41,4

Улучшение работы мельницы связано с уменьшением высоты подъема шаров, увеличением оборачиваемости шарового заполнения и увеличением продолжительности сушки влажного угля. Фактически, заимствуя опыт работы цементных мельниц, угольные ШБМ приближаются к габаритам трубных мельниц. Заметим, что Ш-50 с регулируемым электроприводом превзойдет по эффективности модернизированную мельницу Ш-50А.

Две цементные мельницы (табл.2) замкнутого цикла измельчения, обладая практически одинаковым рабочим объемом и производительностью, значительно отличаются соотношением  $L/D$  и незначительно - удельным расходом электроэнергии (на 6,7%). Приведенные прецеденты, с одной стороны, подтверждают влияние на процесс измельчения соотношения  $L/D$ , с другой стороны свидетельствуют о том, что эффективность измельчения угольных мельниц не согласуется с формулами (2,3), а цементных – с формулой (1). Из практики измельчения известно, что мельницы большого диаметра, в отличие от мельниц малого диаметра, обеспечивают большую производительность, но грубый помол, и наоборот.

Таким образом, решение проблемы соотношения  $L/D$  – в компромиссе между достоинствами и недостатками мельниц большого и малого диаметров, оптимально реализуемом в мельницах с плавно-переменной структурой.

#### ФЕНОМЕН ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦ С ЖЕСТКО-ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ (ПЕРЕМЕННЫМ СООТНОШЕНИЕМ $L/D$ )

Проблему эффективного размола угля пытались решить в биконических мельницах с

жестко-переменной структурой, у которых корпус сложной формы состоит из двух направленных в разные стороны конусов, соответственно короткого входного, с углом  $120^{\circ}$ , и длинного на выходе, с углом  $60^{\circ}$ . Между конусами расположена цилиндрическая часть. Особенность этих мельниц в том, что впервые в энергетике пытались реализовать один из главных принципов измельчения – классификацию коллектива шаров вдоль корпуса мельницы. Взаимоисключающая эклектичность конструкции биконической мельницы не позволила решить эту важнейшую проблему. Исследование биконической мельницы ШК-25 показало ее экономичность, хотя расчетная производительность 25 т/ч так и не была достигнута. К сожалению, в отличие от работ, в работах не приводятся данные о характере классификации мелющих тел, что косвенно подтверждает ее отсутствие. Тем не менее, биконическая мельница является первым, но не единственным агрегатом с жестко-переменной структурой.

Известно, что трубные цементные мельницы по длине разделены на три камеры двумя междуканальными перегородками и выходной решеткой с эрлифтом.

Сложным и не эффективным разделением мельниц на камеры предпринята попытка хотя бы частично классифицировать шары по размерам, обеспечить разный коэффициент заполнения мелющих тел и средневзвешенный шар, реализовать разные скоростные режимы работы шаров вдоль мельницы. Секционирование мельниц по камерам в горнорудной промышленности решено путем многостадийного измельчения в нескольких коротких мельницах. Реко-

мендованный в мировой практике коэффициент заполнения и сортамент шаров (табл.3) в каждой камере различны и, что чрезвычайно важно, их

количество постоянно уменьшается на  $\Delta\phi = 3\%$  по камерам.

Таблица 3

### Значения коэффициента заполнения и сортамента шаров

Параметры	Шаровая загрузка по трем камерам трубных мельниц		
	Дробление	Измельчение	Домол
Режимы работы	Водопадный (ударный)	Водопадно-каскадный (раздавливающий)	Каскадный (истирающий)
Скоростные траектории падения шаров			
Диаметры шаров, мм	100...60	60...30	30...20
Средневзвешенный шар, мм	74,5	44,8	25,1
Коэффициент заполнения шарами, %	30	27	24
Приращение количества шаров по камерам	$\Delta\phi = 3\% = \text{const}$		

Таким образом, в трубных мельницах, хотя полностью и не решены, но обозначены важнейшие приоритеты оптимальной технологии измельчения. Рассмотрим еще одну необычную трубную трехкамерную ступенчатую мельницу фирмы "Maag", измельчающую хромит и магнезит на Запорожском огнеупорном заводе (Украина). Диаметр первой камеры этой мельницы - 2,3 м, а второй и третьей - 1,8 м. Ступенчатая

мельница - еще один удивительный агрегат с переменным соотношением  $L/D$ , заслуживающий особого внимания. Работу шаровых мельниц различных конструкций можно сравнивать между собой только при строгом соблюдении трех начальных условий: измельчение одного и того же материала при одинаковых рабочих объемах мельницы и загрузках шаров.

Таблица 4

### Паспортные данные промышленных мельниц

Параметры	Серийная трубная мельница размерами 2,0 x 10,5 м.	Ступенчатая мельница фирмы МААГ 2,3/1,8 x 11 м.
Эквивалентный диаметр, м	2,0	1,96
Рабочий объем, м <sup>3</sup>	28,0	27,5
Шаровая загрузка, т	32,0	29,0
Потребляемая мощность, кВт	540,0	365,0
Производительность по цементу, т/ч	12,0	21,9
Производительность по хромиту и магнезиту, т/ч	5,4	10,0
Удельный расход электроэнергии на 1 т материала, кВт·ч/т	45,0	16,6
Приведенная эффективность	1,0	2,71

Для сравнения в табл. 4 приведены паспортные данные по измельчению цемента одной марки промышленными мельницами разной конструкции. На огнеупорном заводе эти мельницы измельчают хромит и магнезит, что дополнительно и однозначно гарантирует достоверность полученных результатов. Две сравниваемые мельницы обладают почти одинаковыми начальными условиями. Однако рабочий объем ступенчатой мельницы на 2%, а шаровое заполнение на 10% меньше противопоставляемой мельницы, что создает существенные преимущества трубной мельнице. Одинаковое отношение производительности сравниваемых мельниц при измельчении цемента и хромита - магнезита (21,9:12=10:5,4), исключает случайность анализируемых результатов и дополнительно подтверждает их достоверность. Несмотря на преимущества по начальным условиям трубной мельницы, эффективность (приведенное соотношение удельного расхода электроэнергии на 1 т измельчаемого продукта) ступенчатой мельницы в 2,71 раза выше эффективности мельницы классической конструкции, а удельный расход электроэнергии составляет 16,6 кВт·ч/т.

Таким образом, получен фундаментальный результат, неопровержимо подтверждающий эффективность мельниц с переменным соотношением  $L/D$ , в которых частично реализуются: классификация мелющих тел, переменное заполнение шаров по камерам, разные скоростные режимы работы шаров вдоль мельницы.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Капельсон Л.М. Исследование условий размола угля в биконической шаровой мельнице / Л.М. Капельсон, Б.С. Карпов // Теплоэнергетика. - 1962, - № 12. - С. 23 - 25.
2. Дуда В. Цемент. - М.: Стройиздат, 1981 - 240 с.
3. Ковалюх В.Р. Оптимизация процесса измельчения в шаровых мельницах с регулируемым электроприводом / В.Р. Ковалюх // Цемент. - 1985, - № 8. - С. 3 - 5.
4. Ковалюх С.В. Современная концепция измельчения в универсальной трубно-конусной мельнице с регулируемым электроприводом / С.В. Ковалюх // Цемент. - 2000, - №1. - С. 26 - 30.