

УДК 622.6

С.В. КОВАЛЮХ

(Украина, Харьков, НПП "КВАР")

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНЫЙ АГРЕГАТ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ – КОНУСНАЯ МЕЛЬНИЦА С РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Шаровая мельница (ШМ) является консервативным измельчительным агрегатом (первый патент ШМ выдан в Германии в 1881 г.), который практически не претерпел радикальных изменений. Это свидетельствует как о достоинствах и незаменимости ШМ, так и о серьезных недостатках. Проблема измельчения традиционно решается с позиций отдельных частных решений:

- секционирование мельниц по камерам;
- классификация шаров;
- выбор коэффициента заполнения и сортамента шаров;
- выбор профиля броневой футеровки 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:

$$\text{цементные:} \quad Q = kV \sqrt{D} \sqrt{\frac{G}{V}}; \quad (1)$$

$$\text{углеразмольные:} \quad B = kD^{2,4} n^{0,8} \varphi^{0,6} L; \quad (2)$$

$$\text{горнорудные:} \quad Q = kD^{2,5} L, \quad (3)$$

где B , Q – производительность мельницы, т/ч; k – постоянный коэффициент; V – рабочий объем мельницы, м³; D – внутренний диаметр, м; L – длина мельницы, м; G – масса шаров, т; φ – коэффициент заполнения мелющих тел; n – частота вращения мельницы, об/мин.

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. 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 (2) и (3) 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 отсутствует, при этом параметр $n^{0,8}$ при постоянной частоте вращения классических мельниц является не более чем постоянный коэффициент k ;

– в (1) и (2) отмечено незначительное влияние шаровой загрузки, а в (3) 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 в полной мере не отражают процесса измельчения.

Влияние соотношения L/D на эффективность измельчения

Из формул (2) и (3) следует, что производительность в большей степени зависит от внутреннего диаметра мельницы D , чем от ее длины L , при этом не оговаривается важнейшее условие – границы достоверности и применимости этих параметров. Вернее, вопреки инженерному смыслу, утверждается, что максимальную производительность можно обеспечить при $D \rightarrow \infty$, а $L \rightarrow 0$?

На обогатительных фабриках применяют мельницы различных типов. Например, для измельчения алунита используют углеразмольные, а для циркониевого песка цементные (трубные) шаровые мельницы. Углеразмольная мельница ШБМ 400/800 (Ш-50) оказалась неэффективной, и только *вопреки* формулам (2,3), перераспределив L/D [1], была принята в эксплуатацию базовая в энергетике мельница ШБМ-370/850 (Ш-50А). Это позволило снизить удельный расход электроэнергии на 9,2%. Улучшение работы мельницы связано с уменьшением высоты подъема шаров, увеличением оборачиваемости шарового заполнения и увеличением процесса сушки.

Для горнорудных ШМ [2] известны многочисленные случаи увеличения длины мельницы с помощью вставных царг длиной от 600 до 1200 мм, что позволило увеличить производительность на 14–20 т/ч.

Приведенные прецеденты, с одной стороны подтверждают влияние на процесс измельчения соотношения L/D , с другой – свидетельствуют о том, что

эффективность измельчения мельниц не согласуется с формулами (2, 3). Из практики измельчения известно [3], что мельницы большого диаметра, в отличие от мельниц малого диаметра, обеспечивают большую производительность, но у них грубый помол, и наоборот.

Таким образом, решение проблемы соотношения L/D заключается 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, состоящей из двух направленных в разные стороны конусов: соответственно короткого входного с углом 120° и длинного на выходе с углом 60° . 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. 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 междукамерными 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. Рекомендованный в мировой практике [3] коэффициент заполнения и сортамент шаров (табл.1) в каждой камере различны и, что чрезвычайно важно, их количество постоянно уменьшается на $\Delta\varphi = 3\%$ по камерам.

Таким образом, в трубных мельницах, хотя полностью не решены, но обозначены важнейшие приоритеты оптимальной технологии измельчения.

Таблица 1

Параметр	Шаровая загрузка по трем камерам трубных мельниц		
	Дробление	Измельчение	Домол
Режим работы			
Скоростные траектории падения шаров	Водопадный (ударный)	Водопадно-каскадный (раздавливающий)	Каскадный (истирающий)
Диаметры шаров, мм	100...60	60...30	30...20

Підготовчі процеси збагачення

Средневзвешенный шар, мм	74,5	44,8	25,1
Коэффициент заполнения шарами, %	30	27	24
Приращение количества шаров по камерам	$\Delta\varphi = 3\% = \text{const}$		

Рассмотрим еще одну необычную трубную трехкамерную, *ступенчатую* мельницу фирмы "Мааг", измельчающую хромит и магнезит на Запорожском огнеупорном заводе. 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.

Таблица 2

Параметр	Серийная трубная мельница 2,0×10,5, м.	Ступенчатая мельница фирмы МААГ 2,3/1,8×11, м.
Эквивалентный диаметр, м	2,0	1,96
Рабочий объем, м ³	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

Работу шаровых мельниц различных конструкций можно сравнивать между собой только при строгом соблюдении начальных условий: измельчение одного и того же материала при одинаковых рабочих объемах мельницы и загрузках шаров.

Для сравнения в табл. 2 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 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.

Влияние частоты вращения мельницы и коэффициента заполнения шаров на эффективность измельчения

Принципиальные недостатки шаровых мельниц с постоянной частотой вращения заключаются в том, что оптимальная высота подъема шаров непрерывно меняется (дрейфует) в зависимости от изменения внутренних факторов: интенсивно истирающихся шаровой загрузки и профиля футеровки. Изменяющиеся в широком диапазоне внешние факторы (крупность, влажность, размолоспособность, соотношение компонентов) требуют корректировать высоту подъема шаров в зависимости от характера процесса измельчения, что невозможно обеспечить профилем футеровки и степенью заполнения мелющих тел. Классическая система автоматического регулирования загрузки исходным материалом не позволяет компенсировать внешние и внутренние факторы. Переход на измельчение цемента других марок требует переналадки технологических режимов работы мельницы. Эффективно выбрать режимы работы в соответствии с требованиями технологии (компенсировать внешние и внутренние возмущения) можно мгновенно, корректируя процесс измельчения частотой вращения мельницы в автоматическом режиме.

Из (2) следует, что параметры $n^{0,8}$, $\varphi^{0,6}$ существенно не влияют на производительность мельницы. По этой же причине эти параметры в формулах (1), (3) вообще отсутствуют. Наши многолетние исследования ШМ с регулируемым электроприводом в различных отраслях промышленности позволили не только повысить производительность до 50%, с высокой точностью ($\pm 0,5\%$) стабилизировать тонкость помола, но и доказать, что эффективность измельчения при заданных соотношениях L/D главным образом зависит от частоты вращения мельницы в строгом соответствии с коэффициентом заполнения мелющих тел [5].

Регулируемый электропривод позволяет:

– осуществить плавный пуск мельниц, обеспечив долговечность работы редуктора;

– выбрать оптимальную траекторию падения шаров на “шаровую пятю” с учетом непрерывно изменяющихся характеристик измельчаемого материала и состояния шаров, а также корректировать во времени дрейф статической характеристики в автоматическом режиме работы;

– реализовать оптимальную систему комбинированного управления на основе двух каналов: безынерционного канала управления частотой вращения мельницы и инерционного (корректирующего) канала управления загрузкой исходным материалом.

Наиболее полные исследования ШМ с регулируемым (в диапазоне от 0 до $1,4 n_{кр}$) электроприводом в поле параметров “частота вращения – коэффициент заполнения мелющих тел” были проведены на мельнице размерами 2/10,5 м Белгородского цементного завода [4, 5]. Полученные три оптимальных режима (рис. 1, 2) помимо практического значения представляют теоретический интерес, поскольку позволяют объяснить эффективность различных частот вращения мельницы: ($n > n_{ном}$; $n = n_{ном} = 0,76 n_{кр}$; $n < n_{ном}$), примирив их многочисленных сторонников и противников.

Из данных, приведенных на рис. 1 и 2, можно сделать следующие выводы:

– меньшей частоте вращения мельницы должна соответствовать большая шаровая загрузка;

– для обеспечения режима максимальной производительности при заданной тонине и минимальном удельном расходе электроэнергии необходимо, чтобы: $\varphi = 0,36$ и $n_{опт.} = 0,65 n_{кр}$;

– реализовать этот режим можно только с помощью регулируемого электропривода, позволяющего не только находить оптимальный режим работы, но и корректировать дрейф статической характеристики во времени системой автоматического управления;

– скоростные режимы $n = 0,76 n_{кр}$ ($\varphi = 0,32$) и особенно $n = 0,9 n_{кр}$ ($\varphi = 0,28$) являются ложными оптимумами, так как реальное шаровое заполнение находится на более низком уровне и ограничено мощностью и частотой вращения нерегулируемого электропривода;

– полученные закономерности имеют универсальный характер для мельниц любых типоразмеров.

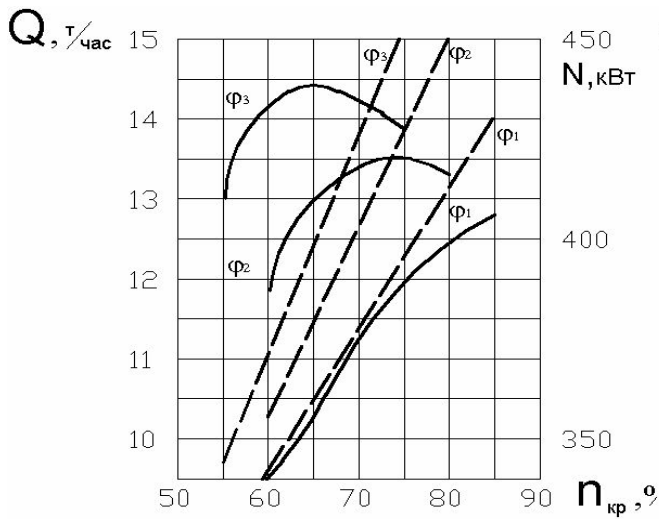


Рис. 1. Зависимость производительности мельницы Q и потребляемой мощности N (пунктирные прямые) от коэффициента заполнения шаров ($\varphi_1=0,28$; $\varphi_2=0,32$; $\varphi_3=0,36$) и скорости вращения мельницы n

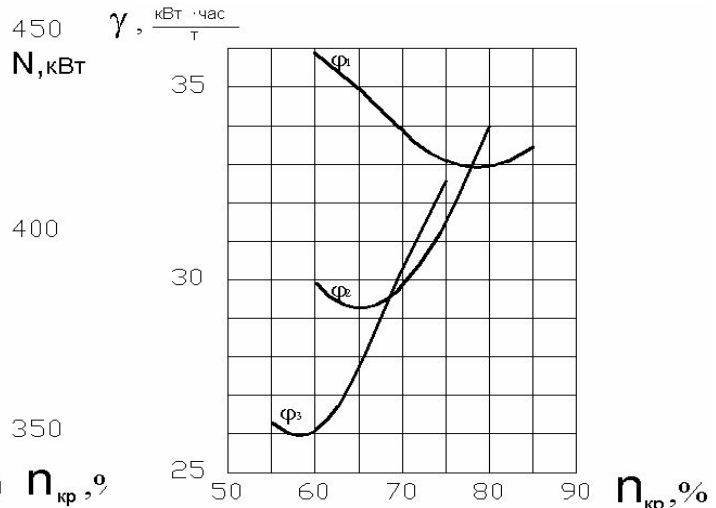


Рис. 2. Зависимость γ удельного расхода электроэнергии от коэффициента заполнения шаров ($\varphi_1=0,28$; $\varphi_2=0,32$; $\varphi_3=0,36$) и скорости вращения мельницы n

Ети результати и висновки повністю зводяться з висновками доктора Беке Бела [9], котрий аналитическим путем потвердил повне зводення зводисностей (рис. 1 и 2), сравнил наши результати, приведенные в работе [5], с результати италянских исследований [7], независимо от полученных на цементном заводе "Гидония" в Риме на трех мельницах размерами 4,8/15,4 м, с регулируемым безредукторным электроприводом мощностью 6 тыс. кВт. Диапазон регулирования этих мельниц ограничен пределами от 0,66 $n_{кр.}$ до 0,79 $n_{кр.}$, т.е. всего 13%.

Таким образом, оптимальный режим работы ШБМ при заданных значениях соотношения L/D однозначно и существенно зависит от совместного взаимодействия частоты вращения мельницы и коэффициента заполнения шарами. Частота вращения мельницы как регулирующее воздействие позволяет создать оптимальную систему комбинированного управления ШБМ, способную корректировать дрейф статической характеристики, компенсируя внешние и внутренние возмущения, с высокой точностью стабилизировать тонкость помола цемента и повысить производительность практически в 1,5 раза.

Универсальная трубно-конусная мельница плавно-переменной структуры

Анализ теории и практики измельчения, особенно мельниц с регулируемой частотой вращения и переменным соотношением L/D , позволил сформулировать главную концепцию измельчения и на ее основе создать измельчительный агрегат нового поколения: универсальную трубно-конусную

мельницю (ТКМ) с регулируемым электроприводом. ТКМ (рис. 3) имеет уменьшающийся в сторону разгрузки конусный корпус. В отличие от других мельниц ТКМ может быть установлена на общей раме, что позволяет наклонять конусный корпус относительно продольной оси в пределах угла наклона между образующей конуса и горизонталью. Наклон корпуса позволяет регулировать (перераспределять) заполнение шаров по длине конуса как в ручном, так и в автоматическом режиме и является принципиально новым и эффективным регулирующим воздействием.

В ТКМ впервые в мировой практике решена **главная концепция** измельчения: реализовано единственно возможное и оптимальное местоположение как каждого рабочего энергоносителя – измельчающего шара в зависимости от его диаметра, так и всего коллектива шаров в строго соответствующих поперечных сечениях по всей длине конусного корпуса с одновременной реализацией оптимальных скоростных траекторий падения шаров и их оборачиваемости в каждом из этих сечений. В этом суть проблемы измельчения.

Непосредственно из решения главной концепции измельчения вытекает *неопровержимая* совокупность достоинств ТКМ, *системно* объединяющих в одном агрегате в полном объеме весь комплекс прогрессивных технологических и конструкторских решений, позволяющих:

1. Автоматически организовать идеально убывающую классификацию коллектива шаров различного диаметра в каждом из поперечных сечений по всей длине конусного корпуса.

2. Организовать плавный переход оптимальных скоростных траекторий падения шаров и их оборачиваемость в зависимости от изменения радиуса конуса: от ударного в начале, раздавливающего в середине, до истирающего в конце мельницы.

3. Обеспечить оптимально убывающий по длине конусного корпуса коэффициент заполнения шаровой загрузки.

4. Обеспечить оптимальное саморегулирование сортамента шаров (средневзвешенного шара).

5. Реализовать оптимальный компромисс между достоинствами и недостатками мельниц большого и малого диаметров (соотношение L/D).

6. Изменением наклона корпуса относительно продольной оси корректировать в пределах одного и того же заполнения оптимальный режим работы, перераспределяя загрузки шаров в начале и конце мельницы.

7. С помощью небольшого наклона конуса снизить давление шаров на торцевые днища мельницы, соответственно уменьшив их совместное истирание и вредное влияние "пристеночного" эффекта.

8. За счет идеальной классификации мелющих тел отказаться от междукамерных перегородок, что увеличит рабочий объем и сократит в три

раза количество люков на корпусе ТКМ.

9. Организовать в однокамерной ТКМ замкнутый цикл измельчения с проходным сепаратором по типу угольных ШБМ и отказаться от выходной решетки с эрлифтом, тем самым радикально упростить всю технологию измельчения.

10. Улучшить аэродинамику, так как однокамерная ТКМ представляет собой конус – сопло (конфузор).

11. Обеспечить автоматическую догрузку по одному шару максимального диаметра во времени по всей длине однокамерной ТКМ в процессе непрерывной работы мельницы.

12. Работать, не снижая производительности может на изношенной и гладкой броне, так как скоростные режимы жестко зависят от переменного радиуса мельницы, т.е. ТКМ не критична к профилю броневой футеровки.

13. Выровнять неравномерное истирание мелющих тел по всей длине мельницы и снизить износ шаров благодаря их рациональному заполнению и оптимальной работе.

14. Увеличить коэффициент использования рабочего времени агрегата.

15. Уменьшить потребляемую мощность, габариты, металлоемкость, капитальные затраты и объем ремонтно-эксплуатационных работ.

Приведенные достоинства ТКМ полностью согласуются с современными представлениями о процессе измельчения. Можно утверждать, что конструкция ступенчатой мельницы с жестко-переменным соотношением L/D является частным решением обобщенной *интегрально-многоступенчатой конструкции ТКМ с плавно-переменной структурой*. При увеличении числа ступенек в мельнице "Маг" ее эффективность возрастет и будет соответственно значительно больше 271%. Интегрирование бесконечно большого количества ступенек в мельнице приведет к конструкции ТКМ.

Новый механизм классификации шаровой загрузки в ТКМ начинается в момент отрыва шара и его свободного полета по траектории, создаваемой конусным корпусом, отличной от традиционной для классических мельниц. Вектор падения шара в ТКМ перпендикулярен образующей конусного корпуса. Шары падают не вертикально вниз, а под небольшим углом в сторону, противоположную движению материала вдоль мельницы, т.е. в сторону загрузки. Под действием гравитационной силы шар большого диаметра (большого веса) падает дальше, а малого – ближе и, таким образом, происходит сортировка мелющих тел по размерам. Дополнительно в совместном полете шар большого диаметра выдавливает шар малого диаметра в сторону разгрузки. Процесс свободного полета шаров и их идеальная классификация визуально хорошо прослеживается в прозрачных моделях ТКМ.

Разные траектории падения шаров по длине конусного корпуса в сочетании с классификацией шаров оказывают решающее значение на процесс

измельчения. Традиционно эта приоритетная задача решается трудоемким и малоэффективным подбором профиля броневой футеровки. Однако футеровка быстро истирается и ожидаемый эффект резко падает. Кроме того, соответствующие траектории шаров осуществляются не в каждом поперечном сечении мельницы, а одна траектория – на всю длину камеры. В ТКМ траектории падения шаров жестко зависят от радиуса конусного корпуса и не критичны к профилю футеровки. Футеровка в ТКМ служит для предохранения корпуса и увеличения коэффициента сцепления шаровой загрузки при подъеме до точки отрыва в свободный полет.

Нами разработана конструкция бронеплит, устанавливаемых в каждом поясе конусного корпуса путем чередования только трех типоразмеров, а их общее количество сокращено на 20%. Для конусного корпуса разработана также прокатная футеровка. В ТКМ вместо шести технологических люков на корпусе, предназначенных для ремонтных работ и догрузки (перегрузки) шаров, достаточно иметь один или два, что упрощает конструкцию, повышает прочность корпуса, уменьшает пыление и обслуживание. Конусный корпус позволяет значительно сократить и упростить регламентную загрузку и перегрузку шарового заполнения.

Мировой опыт [3] загрузки шаров (табл. 1) рекомендует ступенчатое уменьшение шаров по камерам с постоянным значением $\Delta\phi = 3\%$. В однокамерной ТКМ эта идея реализуется автоматически, причем верхний уровень шаров по всей длине конуса выстраивается на одной горизонтали. Это позволяет упростить трудоемкий и длительный процесс догрузки остановленной мельницы, организовав непрерывную автоматическую догрузку во времени простейшим сбросом в течку работающей мельницы шара максимального диаметра с интервалом, рассчитанным в зависимости от величины износа шаров на 1 т измельчаемого материала. Шар по мере истирания будет передвигаться вдоль конуса, а его место займет следующий новый шар.

Важнейшей и не решенной задачей является выбор сортамента шаров, обобщенно связанного с диаметром средневзвешенного шара d_{cp} .

$$d_{cp} = \frac{d_1 \cdot q_1 + d_2 \cdot q_2 + \dots + d_n \cdot q_n}{q_1 + q_2 + \dots + q_n}$$

где q – вес шара соответствующих диаметров, входящих в состав мелющей загрузки, т; d – диаметр шара, мм.

Сортамент мелющих тел должен обеспечить рациональную мелющую загрузку, которая позволила бы создать большую поверхность контакта с материалом, не допуская свободного прохождения материала в промежутках

Підготовчі процеси збагачення

между шарами без измельчения, и в то же время обеспечить прохождение измельченных фракций вдоль мельницы. В ТКМ эта задача решается автоматическим саморегулированием средневзвешенного шара вне зависимости от того, какой изначально выбран сортament шаров.

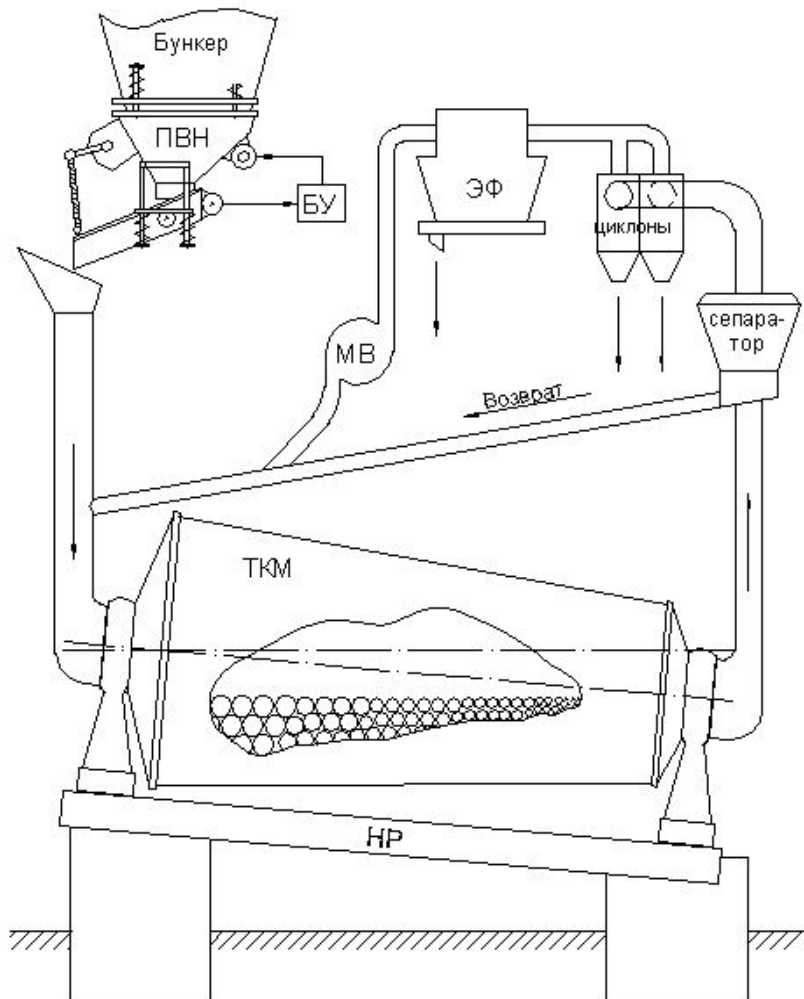


Рис. 3. Универсальная трубно-конусная мельница:
ПВН – питатель вибрационный наклоняемый; БУ – блок управления;
ЭФ – электрофильтр; МВ – мельничный вентилятор;
НР – общая наклонная рама

Различный характер процесса измельчения (табл. 1) по длине классических ШБМ приводит к неравномерному истиранию мелющих тел. Особенно наглядно это явление проявляется в горнорудных стержневых мельницах. Обработанные стержни, представляющие собой единое жесткое по длине мелющее тело, истираются на конус, т.е. интенсивность истирания в конце мельницы выше, чем в начале. Конусный корпус, обеспечивающий

оптимальные технологические режимы работы шаров, позволяет выровнять неравномерное истирание мелющих тел по всей длине мельницы.

При измельчении в ШМ происходит изменение гранулометрического состава исходного материала, выражающегося в уменьшении содержания крупных и увеличении количества мелких частиц. Переизмельченные частицы, но своевременно не выведенные из общей массы материала в мельнице, еще больше измельчаются, препятствуют измельчению крупных частиц и тормозят процесс измельчения в целом. Чем мельче частица, тем у нее меньше внутренних дефектов, тем она более устойчива к разрушению и на ее измельчение требуется больше затрат энергии и времени.

Замкнутый цикл измельчения исключает переизмельчение материала и повышает производительность на 20...25%.

Универсальная ТКМ предназначена для работы в открытом или замкнутом циклах измельчения как для сухих, так и мокрых материалов в различных отраслях промышленности. ТКМ может работать как с регулируемым электроприводом, так и без него.

Таким образом, предлагаются принципиально новые механизм и технология процесса измельчения, на основе которой разработана энергонапряженная ТКМ с регулируемым электроприводом. Совокупная эффективность ТКМ составляет более 271%, причем без дополнительного учета эффективности: регулируемого электропривода (до 50%), замкнутого цикла измельчения (20...25%), регулярной догрузки шаров (13,7%), увеличения рабочего объема ТКМ (11,5%).

Универсальная ТКМ с регулируемым электроприводом – радикальный путь совершенствования измельчительных агрегатов нового поколения, позволяющая конструктивно весьма просто, полностью и оптимально упорядочить режимы работы шаров в соответствии с современной теорией и практикой измельчения.

Оригинальность и принципиальная новизна предлагаемых технических решений подтверждена и защищена многочисленными патентами.

Список литературы

1. **Кисельгоф М.Л., Полферов К.Ф.** Шаровые барабанные мельницы большой производительности // Теплоэнергетика. – 1962. – № 12. – С. 24–30.
2. **Черных С.И.** Повышение производительности отделений измельчения на обогатительных фабриках // Цветметинформация. Сер. Обогащение руд цветных металлов. – 1979. – Вып. 2. – С. 35–43.
3. **Дуда В.** Цемент. – М.: Стройиздат, 1981. – 185 с.
4. **Ковалюх В.Р.** Оптимизация процесса измельчения в шаровых мельницах с регулируемым электроприводом // Цемент. – 1985. – № 8. – С 16–23.
5. **Ковалюх М.В.** Угольная трубно-конусная мельница нового поколения // Теплоэнергетика. – 2001. – №1. – С. 63–68.